

В. І. Савуляк, А. Ю. Осадчук

РУЧНЕ ЕЛЕКТРОДУГОВЕ ЗВАРЮВАННЯ

**Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет**

В. І. Савуляк, А. Ю. Осадчук

РУЧНЕ ЕЛЕКТРОДУГОВЕ ЗВАРЮВАННЯ

Навчальний посібник

Затверджено Вченою радою Вінницького державного технічного університету як навчальний посібник для студентів напрямку підготовки 0923 - "Зварювання". Протокол №11 від 25 червня 2003 р.

Вінниця ВНТУ 2004

УДК 621.791(075)

С 13

Рецензенти:

В. Ф. Анісімов, доктор технічних наук, професор

І. О. Сивак, доктор технічних наук, професор

Р. Р. Обертюх, кандидат технічних наук, професор

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького державного технічного університету Міністерства освіти і науки України

В. І. Савуляк, А. Ю. Осадчук

С13 Ручне електродугове зварювання. Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2004. - 130 с.

Посібник призначено студентам напрямку підготовки - 0923 - "Зварювання" спеціальності - 7.092303 – "Технологія і устаткування відновлення та підвищення зносостійкості машин і конструкцій" для опанування основами ручного електродугового зварювання при вивченні предмета "Спеціальні технології", яке в поєднанні з роботою в майстернях дозволить їм стати кваліфікованими зварниками. Посібник побудовано таким чином, що знання, отримані в курсі "Спеціальні технології", стануть фундаментом для вивчення таких дисциплін, як "Теорія зварювальних процесів", "Зварювання плавленням" та ін. Окрім цього посібник може стати в нагоді й студентам, які вивчають курс "Технології конструкційних матеріалів та матеріалознавства", та студентам будівельних спеціальностей.

УДК 621.791(075)

© В. І. Савуляк, А. Ю. Осадчук, 2004

З М І С Т

ВСТУП.....	4
БЕЗПЕКА ПРАЦІ ПРИ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ	6
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ	10
1.1 Класифікація зварювання й наплавлення.....	10
1.2 Зварні з'єднання та шви.....	13
1.3 Зварюваність металів і сплавів	18
1.4 Підготовка металу під зварювання	27
1.5 Контроль зварних з'єднань.....	31
2 ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ РУЧНОГО ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ НЬОГО.....	40
2.1 Суть способу, обладнання, приладдя, інструмент	40
2.2 Стальний зварювальний та наплавний дріт і електроди.....	42
2.3 Зварювальна дуга	46
2.4 Джерела живлення для дугового зварювання.....	48
2.5 Металургійні процеси при зварюванні плавленням	56
2.6 Технологія ручного дугового зварювання	63
2.7 Підвищення продуктивності ручного дугового зварювання ...	69
3 ЗВАРЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ І ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ.....	72
3.1. Технологія зварювання вуглецевих сталей.....	72
3.1.1 Зварювання низьковуглецевих сталей.....	72
3.1.2 Зварювання середньовуглецевих сталей.....	73
3.2 Технологія зварювання леггованих сталей.....	77
3.2.1 Зварювання низьколеггованих і середньолеггованих конструкційних сталей	77
4 ЗВАРЮВАННЯ ЧАВУНУ, КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ НАПЛАВЛЕННЯ ТВЕРДИХ СПЛАВІВ	87
4.1 Зварювання чавуну	87
4.1.1 Способи зварювання.....	90
4.1.2 Техніка й технологія зварювання.....	91
4.2 Зварювання кольорових металів	93
4.2.1 Мідь і її сплави	93
4.2.2 Алюміній і його сплави	96
4.2.3 Нікель і його сплави	98
4.2.4 Титан і його сплави.....	99
ДОДАТКИ.....	101
ЛІТЕРАТУРА.....	133

ВСТУП

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

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

Розвиток зварювання. Основним видом зварювання є дугове. Основоположниками дугового зварювання є вчені та інженери М. М. Бенардос (1842—1905) та М. Г. Слав'янов (1854—1897), С. Л. Коффін.

Микола Миколайович Бенардос, сам грек за національністю, родом з Миколаївської губернії — автор багатьох винаходів у галузі електротехніки. У 1881 році, працюючи у Франції в Cabot Laboratory під керівництвом Аугуста де Марітенса він уперше застосував електричну дугу між вугільним електродом і металом для зварювання. Після детальної розробки свого винаходу М. М. Бенардос отримав патенти на нього в Англії, Бельгії, Німеччині, Італії, Франції, США та в інших країнах. У 1886 р. він отримав російський патент на “Спосіб з'єднання та роз'єднання металів безпосередньою дією електричного струму”. М. М. Бенардос застосував створений ним спосіб не лише для зварювання, а й для наплавлення та різання металів.

Майже одночасно з М. М. Бенардосом працював ще один російський видатний винахідник — Микола Гаврилович Слав'янов, який багато зробив для розвитку дугового зварювання. Володіючи глибокими знаннями металургії та електромеханіки, М. Г. Слав'янов розробив спосіб дугового зварювання металевим електродом із захистом зварюваної зони шаром порошкоподібної речовини (флюсу) і перший у світі механізм — “електроплавник” — для напівавтоматичної подачі електродного прутка в зону зварювання. Спосіб зварювання плавким металевим електродом дістав назву “дугове зварювання за способом Слав'янова”. Перше публічне демонстрування нового способу відбулося в 1888 р. у Пермі.

Не можна не відзначити роботу американського винахідника із Детройта С. Л. Коффін. У 1890 році він отримав американський патент саме на з'єднання металів по шву за допомогою дугового зварювання плавким електродом.

Винаходи М. М. Бенардоса, М. Г. Слав'янова та С. Л. Коффіна знайшли помітне за тих часів застосування і в першу чергу на залізницях, машинобудівних і металургійних заводах всього світу.

У колишньому Радянському Союзі вперше у світі розроблені такі нові високопродуктивні види зварювання, як електрошлакове, у вуглекислому газі, дифузійне та ін. В Україні фундаментальні дослідження

з розробки нових процесів і технології зварювання проводяться в ряді науково-дослідних організацій, в вузах. Але безперечним одноосібним лідером в розробці та впровадженні нових технологій в галузі зварювання, як в Україні так і в СНД є Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України. Розробки цього інституту відомі в усьому світі, де він теж є одним із найтитулованіших та авторитетніших закладів науки.

На сучасному етапі розвитку зварювального виробництва у зв'язку з розвитком науково-технічної революції дуже виріс діапазон зварюваних товщин, матеріалів, видів зварювання. В наш час зварюють матеріали завтовшки від кількох мікрометрів (у мікроелектроніці) до кількох метрів (у важкому машинобудуванні). Поряд із традиційними конструкційними сталями зварюють спеціальні сталі та сплави на основі титану, цирконію, молібдену, ніобію та інших матеріалів, а також різнорідні матеріали.

Істотно розширилися умови проведення зварювальних робіт. Поряд із звичайними умовами зварювання виконують в умовах високих температур, радіації, під водою, у глибокому вакуумі, в умовах невагомості. Швидкими темпами впроваджуються нові види зварювання — лазерне, електронно-променеве, іонне, світлове, дифузійне, ультразвукове, електромагнітне, вибухове, істотно розширюються можливості дугового та контактного зварювання.

Високий технічний рівень зварювального виробництва передбачає і високий рівень, як загальноосвітньої, інженерної підготовки майбутніх фахівців, так і надання майбутнім бакалаврам, інженерам та магістрам робітничої професії електрозварювальника. Основна мета цього посібника — допомогти студентам бакалаврського напрямку - 6.0923 - “Зварювання” спеціальності - 7.092303 – “Технологія і устаткування відновлення та підвищення зносостійкості машин і конструкцій” у вивченні основ ручного електродугового зварювання для опанування предмета “Спеціальні технології”, яке в поєднанні з роботою в майстернях дозволить їм стати кваліфікованими зварниками. Посібник побудовано таким чином, що знання отримані в курсі “Спеціальні технології” стануть фундаментом для вивчення таких дисциплін, як “Теорія зварювальних процесів”, “Зварювання плавленням” та ін.. Окрім цього посібник може стати в нагоді й студентам, які вивчають курс “Технології конструкційних матеріалів та матеріалознавства” та студентам будівельних спеціальностей.

БЕЗПЕКА ПРАЦІ ПРИ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ

Основними небезпеками та шкідливостями, що призводять до виробничих травм при зварюванні, є:

- ураження електричним струмом при електрозварювальних роботах;
- ураження зору та відкритої поверхні шкіри випромінюванням електричної дуги;
- отруєння організму шкідливими газами, пилом та випарами, що виділяються при зварюванні;
- травми від вибухів балонів стиснутого газу, ацетиленових генераторів і посудин з-під горючих речовин;
- пожежна небезпека та опіки;
- механічні травми при заготівельних і складально-зварювальних операціях;
- небезпека радіаційного ураження при контролі зварених з'єднань радіаційними методами.

Кожний робітник при влаштуванні на роботу проходить інструктаж або спеціальний техмінімум із техніки безпеки.

Техніка безпеки — сукупність технічних та організаційних заходів, спрямованих на створення безпечних і здорових умов праці. Відповідальність за організацію та стан техніки безпеки на підприємстві несе адміністрація цих підприємств.

Загальний контроль за виконанням норм і правил охорони праці, в тому числі правил техніки безпеки, здійснюють відповідні інспекції (*Держгіртехнагляд, Держсанінспекція, Інспекція пожежного нагляду, Держенергонагляд*) та профспілкові організації.

Комплекс заходів із виробничої санітарії, гігієни праці, організації відпочинку, медичного обслуговування та техніки безпеки забезпечують охорону праці працюючих на підприємствах.

Електробезпека. Ураження електричним струмом відбувається при дотику до струмоведучих частин електропроводки та зварювальної апаратури, що застосовується для дугового контактного та променевого видів зварювання. Струми, що проходять через тіло людини, більш ніж 0.05 A (при частоті 50 Гц), можуть викликати важкі наслідки й навіть смерть ($>0.1\text{ A}$). Опір людського організму залежно від його стану (утомленість, вологість шкіри, стан здоров'я) змінюється в широких межах від 1000 до 20000 Ом . Напруга холостого ходу джерел живлення нормальної дуги досягає 90 В , а стиснутої дуги — 200 В . Згідно із законом Ома, при поганому стані зварника через нього може пройти струм, близький до граничного:

$$I = U/R = 90/1000 = 0.09\text{ A}.$$

Електробезпека забезпечується:

- виконанням вимог з електробезпеки електрозварювального обладнання, надійною ізоляцією, застосуванням захисних огорож, автоблокуванням, заземленням електрообладнання та його елементів, обмеженням напруги холостого ходу джерел живлення (генератори постійного струму до 80 В, трансформатори до 90 В);
- індивідуальними засобами захисту (робота в сухому та міцному спецодязі та рукавицях, у черевиках без металевих шпильок та гвіздків);
- додержанням умов роботи (припинення роботи під час дощу та сильного снігопаду, коли немає укриття; користування гумовим килимком, гумовим шоломом та калошами при роботі всередині посудини, а також переносною лампою напругою не більш 12 В; ремонт електрозварювального обладнання та апаратури спеціалістами-електриками).

При ураженні електричним струмом потерпілому треба подати допомогу: звільнити від електропроводів (із додержанням техніки безпеки), забезпечити доступ свіжого повітря, при втраті потерпілим свідомості негайно викликати швидку медичну допомогу, а до прибуття лікаря робити штучне дихання.

Захист зору та відкритої поверхні шкіри. Електрична зварювальна дуга створює три види випромінювання: світлове, ультрафіолетове, інфрачервоне.

Світлові промені діють засліплююче, бо їх яскравість значно перевищує допустимі норми. Ультрафіолетове випромінювання навіть при короткочасній дії протягом кількох секунд викликає захворювання очей, що називається електроофтальмією. Воно супроводжується гострим болем, різню в очах, слезотечею, спазмами повік. Тривала дія ультрафіолетового випромінювання призводить до опіків шкіри. Інфрачервоне випромінювання при тривалій дії викликає помутніння кришталика ока (катаракта), що може призвести до послаблення та втрати зору, теплова дія цих променів викликає опіки шкіри.

Захист зору та шкіри обличчя при дуговому зварюванні забезпечуються використанням щитків, масок або шоломів із жаростійких діелектриків (фібри, просоченої спеціальним розчином, фанери і т. ін.) із захисними стеклами — світлофільтрами (розмір 52x102 мм), що витримують і поглинають випромінювання дуги. Залежно від потужності дуги застосовують різні світлофільтри. Для захисту від випромінювання дуги в стаціонарних умовах встановлюють закриті кабінки, а при будівельних і монтажних роботах використовують переносні щити та ширми. Для охорони тіла застосовують спецодяг із цупкого брезенту чи сукна, іноді з асбестової тканини.

Захист від отруєння шкідливими газами, пилом і випарами. Склад і кількість шкідливих газів, пилу та випарів залежать від виду зварювання, складу захисних засобів (покриття, флюсів, газів), зварюваного та електродного матеріалів. Кількість зварювального пилу (аерозолі) та летких сполук при зварюванні становить від 10 до 150 мг на 1 кг розплавленого електродного металу. Основними складовими є оксиди заліза (до 70 %), марганцю, кремнію, хрому, фтористі та інші сполуки. Найшкідливішими є хром, марганець та фтористі сполуки. Крім аерозолі повітря в робочих приміщеннях при зварюванні забруднюється різними шкідливими газами: оксидами азоту, вуглецю, фтористим воднем та ін.

Поряд із короточасним отруєнням, що проявляється як запаморочення, головна біль, нудота, блювання, слабкість та ін., отруйні речовини можуть відкладатися в тканинах організму людини і викликати хронічні захворювання. Особливу увагу слід звертати на концентрацію марганцю, бо його наявність у повітрі більше 0.3 мг/м^3 може викликати важкі захворювання нервової системи.

Найшкідливішим є зварювання покритими електродами, а при автоматичних методах зварювання кількість шкідливих виділень значно менша.

Основними заходами, спрямованими на захист від отруєння шкідливими виділеннями при зварюванні та поліпшення умов праці, є:

- застосування місцевої та загальнообмінної вентиляції;
- механізація та автоматизація зварювальних процесів;
- заміна шкідливих процесів і матеріалів менш шкідливими (наприклад, заміна електродів з кислим покриттям з великим вмістом оксиду марганцю на рутилові);
- застосування ізолюючих та захисних пристроїв;
- в особливо небезпечних випадках використання індивідуальних засобів захисту (респіратори з хімічним шоломом, протигази).

Пожежна безпека. Причинами пожежі при зварювальних роботах можуть бути іскри та краплі розплавленого металу та шлаку, необережне поводження з полум'ям пальника при наявності горючих матеріалів поблизу робочого місця зварника. Небезпеку пожежі особливо слід враховувати на будівельно-монтажних майданчиках і при ремонтних роботах у непристосованих для зварювання приміщеннях.

Основні вимоги пожежної безпеки викладено в *“Правилах пожежної безпеки при проведенні зварювальних та інших вогневих робіт на об'єктах народного господарства”*. Місця, де виконується зварювання, мають бути оснащені вогнегасниками, ящиками з піском, лопатами та совками, бочками чи відрами з водою. Дерев'яні конструкції, розташовані ближче 5 м від зварювальних постів, обштукатурюють або оббивають листовим азбестом чи листовою сталлю по повсті, змоченій у глинистому розчині. В зоні попадання бризків металу та іскор не повинно бути займистих предметів. Легкозаймисті та вибухонебезпечні матеріали мають

бути на відстані не менш як 30 м від місця зварювання. Дерев'яні підлоги, настили, помости при потребі захищають від іскор і крапель розплавленого металу та шлаку листами азбесту чи заліза. Зварників забезпечують спецодягом, взуттям, рукавицями та головним убором.

Для забезпечення *вибухобезпеки* зварювальні роботи в місткостях з-під горючих продуктів виконують лише після їх ретельної очистки від залишків продуктів і дво-, трикратного промивання гарячим 10%-ним розчином лугу з наступним продуванням парою чи повітрям. Газопроводи можна ремонтувати тільки після ретельного продування їх.

Травми (удари, порізи) бувають при заготівельних і складально-зварювальних операціях. Такі травми спричинюються недодержанням техніки безпеки під час роботи на металорізальному обладнанні при заготівельних операціях, відсутністю пристроїв для транспортування і складання важких деталей; несправністю транспортних засобів — візків, ланцюгів, тросів, захватів; недотриманням персоналом основних правил із такелажних робіт; несправністю інструмента — ковадел, молотків, зубил, ключів і т. ін.

Основними заходами із зниження травматизму є продумані з точки зору безпеки робіт технологія заготівлі, складання та зварювання, правильне оснащення робочих місць та додержання персоналом основних правил з техніки безпеки.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Класифікація зварювання й наплавлення

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

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

Основними джерелами теплоти при зварюванні плавленням є зварювальна дуга, газове полум'я, променеві джерела енергії і теплота, що виділяється при електрошлаковому процесі.

Джерела теплоти характеризуються температурою та концентрацією, яка визначається найменшою площею нагріву (пляма нагріву) та найбільшою густиною теплової енергії у плямі нагріву.

Ці показники (табл. 1) визначають технологічні властивості джерел нагрівання металу при зварюванні, наплавленні та різанні. З табл. 1 видно, наприклад, що ступінь зосередженості теплоти в дузі в десятки разів. у плазмі — в тисячі разів, у фотонному промені (при лазерній обробці) — в десятки тисяч разів вищий, ніж у газовому полум'ї.

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

Дугове зварювання — зварювання плавленням, при якому нагрівання здійснюють електричною дугою. Особливим видом дугового зварювання є плазмове зварювання, при якому нагрівання здійснюють стиснутою дугою.

Газове зварювання — зварювання плавленням, при якому кромки з'єднаних частин нагрівають полум'ям газів, стиснутих на виході пальника для газового зварювання.

Електрошлакове зварювання — зварювання плавленням, при якому для нагрівання металу використовують теплоту, що виділяється при проходженні електричного струму через розплавлений електропровідний шлак.

При *електронно-променевому зварюванні* для нагрівання з'єднаних частин використовують енергію електронного променя. Теплота виділяється за рахунок бомбардування зони зварювання напрямленим електронним потоком.

Місьцеве розплавлення з'єднаних частин при *лазерному зварюванні* здійснюють енергією світлового променя, одержаного від лазера.

При *термітному зварюванні* використовують теплоту, що утворюється в результаті спалювання терміт-порошку, який складається із суміші алюмінію та оксиду заліза.

Таблиця 1 – Характеристика основних джерел енергії для зварювання та різання

Джерело енергії	Температура, °C	Найменша площа нагріву, см ²	Найбільша густина енергії у плямі, Вт/см ²
Електрошлаковий процес	2 000...2 200	-	-
Газове полум'я	3000...3500	$1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^4$
Дуга в парах металу	4 500...6 000	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^5$
Дуга в газах	5 000...20 000	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^5$
Мікроплазма	-	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^7$
Електронний промінь	-	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^8$
Фотонний промінь	-	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^9$

До **термомеханічного** класу належать види зварювання, при яких використовується теплова енергія й тиск — контактне, дифузійне, газопресове, дугопресове та ін.

Основним видом термомеханічного класу є контактне зварювання — зварювання із застосуванням тиску, при якому нагрівання здійснюється теплотою, що виділяється при проходженні електричного струму через з'єднані частини, які перебувають у контакті.

Дифузійне зварювання — зварювання тиском, яке здійснюється взаємною дифузією атомів контактуючих частин при відносно тривалій дії підвищеної температури і незначній пластичній деформації.

При пресових видах зварювання з'єднані частини можуть нагріватися полум'ям газів, спалюваних на виході зварювального пальника (газопресове зварювання), дугою (дугопресове зварювання), електрошлаковим процесом (шлакопресове зварювання), індукційним нагріванням (індукційно-пресове зварювання), термітом (термітнопресове зварювання) і т. п.

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

Холодне зварювання — зварювання тиском при значній пластичній деформації без зовнішнього нагрівання з'єднаних частин.

Зварювання вибухом — зварювання, при якому з'єднання здійснюється в результаті викликаного вибухом зіткнення частин, що швидко рухаються.

Ультразвукове зварювання — зварювання тиском, що здійснюється при дії ультразвукових коливань.

Зварювання тертям — зварювання тиском, коли нагрівання здійснюється за рахунок тертя, що виникає внаслідок взаємного обертання зварюваних частин.

Зварювальні процеси використовують для наплавлення. *Наплавлення* — процес нанесення за допомогою зварювання шару металу на поверхню виробу. Наплавлення застосовують для відновлення спрацьованих деталей і одержання виробів із заданими властивостями поверхні: зносостійкістю при нормальних і підвищених температурах, жаростійкістю, жароміцністю, кислотостійкістю та ін.

Для наплавлення застосовують в основному дугові види зварювання: ручне плавкими й неплавкими електродами, механізоване та автоматичне під флюсом і в захисних газах, вібродугове, плазмове. Поряд із дуговим застосовують газове, електрошлакове, індукційне, пічне наплавлення.

Є кілька способів одержання наплавленого легованого металу заданого хімічного складу:

- використання легованого електродного стержня, електродного дроту або стрічки суцільного перерізу і нелегуючих покриттів, флюсу або захисного газу;
- використання дроту і стрічок із легованими наповнювачами у поєднанні з нелегуючими покриттями, флюсом або захисним газом;
- використання нелегованого електродного стержня, дроту або стрічки та легованого покриття чи флюсу;
- нанесення легуючих домішок у вигляді порошків, паст, брикетів і т. д. на поверхню, що має бути наплавлена.

Можливі комбінації цих методів.

Ручне дугове наплавлення застосовують при відновленні спрацьованих поверхонь, відновленні браку литва і для наплавлення поверхонь із спеціальними властивостями.

Ручне дугове наплавлення виконують покритим плавким і неплавким електродами, розплавленням шару сипкого наплавного сплаву.

Автоматичне наплавлення під флюсом виконують дротами суцільного перерізу та порошковими, одним електродом, окремими валиками, одночасно кількома електродами та електродною стрічкою. Використовують стрічки суцільного перерізу та порошкові.

Наплавлення плавким і неплавким електродом у середовищі захисних газів. Наплавлення вольфрамовим електродом провадять у середовищі аргону. Потрібні властивості наплавленого металу забезпечуються застосуванням присаджувальних дротів спеціального складу або вдуванням легуючих порошків у зону дуги.

Можна наплавляти в інертних газах і плавким електродом, проте застосування тієї самої технології, що й для зварювання, веде до

підвищеного вмісту основного металу в наплавці, тому використовують додатковий присаджувальний дріт. Цей спосіб широко використовують при наплавленні високолегованих хромонікелевих сталей та сплавів.

Плазмове наплавлення здійснюється кількома способами:

- плазмою прямої дії з подачею присаджувального наплавного дроту;
- з подачею присаджувального порошку в плазмовий струмінь;
- по шару легуючого матеріалу, нанесеного на поверхню виробу;
- зі струмоведучим присаджувальним дротом;
- з двома плавкими електродами.

Електрошлакове наплавлення здійснюється на плоскі та циліндричні поверхні для створення поверхневих шарів з особливими властивостями і для створення проміжних шарів на кромках заготовок для наступного зварювання. Техніка електрошлакового наплавлення принципово не відрізняється від техніки зварювання.

Вібродугове наплавлення застосовують в основному як засіб відновлення деталей, що швидко спрацьовуються, верстатного, металургійного, сільськогосподарського обладнання. Цьому виду наплавлення можна піддавати деталі діаметром 8...10 мм і вище. Суть вібродугового наплавлення полягає в тому, що наплавлення здійснюють за допомогою спеціальної головки, яка забезпечує подачу й вібрацію електродного дроту, що полегшує збудження дуги і підвищує стабільність процесу. При наплавленні електричні розряди чергуються з короткими замиканнями. В зону наплавлення та дуги подається лужна емульсія, що захищає метал від дії повітря та охолоджує деталі, внаслідок чого зменшуються зона термічного впливу та зварювальні деформації і підвищується твердість наплавного шару.

Газокисневе полум'я використовують головним чином для наплавлення литими твердими сплавами.

1.2 Зварні з'єднання та шви

Зварне з'єднання — це нерознімне з'єднання, виконане внаслідок введення концентрованої енергії у зону з'єднання, що супроводжується складними фізичними та хімічними процесами.

До *фізичних* належать процеси, які, змінюючи фізичні властивості речовини, не змінюють будови елементарних частинок, із яких складається дана речовина, і не призводять до зміни її хімічних властивостей. При зварюванні це нагрівання металу, його плавлення й кристалізація, поширення теплоти, деформація виробу.

Хімічні процеси змінюють будову елементарних частинок, із яких складається речовина, в результаті чого утворюються нові речовини з новими хімічними та фізичними властивостями. До основних хімічних зварювально-металургійних процесів належать хімічні реакції взаємодії зварюваного металу з газами, покриттями та флюсами.

Фізичні та хімічні процеси при зварюванні пов'язані між собою в часі та просторі, тому їх можна об'єднати спільним поняттям «фізико-хімічні процеси». Під дією фізико-хімічних процесів створюється характерна будова зварного з'єднання.

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

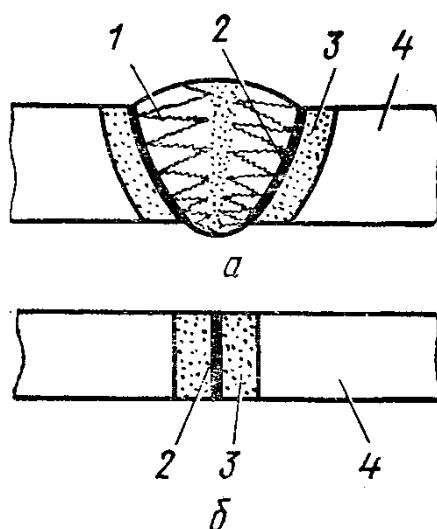


Рисунок 1 - Схема зварного з'єднання:

а — при зварюванні плавленням; *б* — при зварюванні тиском;
 1 — зварний шов; 2 — зона сплавлення (зчеплення); 3 — зона термічного впливу; 4 — основний метал

З'єднання, виконане *зварюванням тиском* (рис. 1, б) у твердому стані, складається із зони з'єднання 2, де утворилися міжатомні зв'язки з'єднуваних частин, зони термомеханічного впливу 3, основного металу 4.

У формуванні структури та властивостей зварного з'єднання при зварюванні плавленням визначальна роль належить тепловим процесам, при зварюванні тиском — пластичній деформації.

Зварні з'єднання можуть бути *стиковими, кутовими, тавровими* та з'єднаннями *внапусткок* (рис. 2).

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

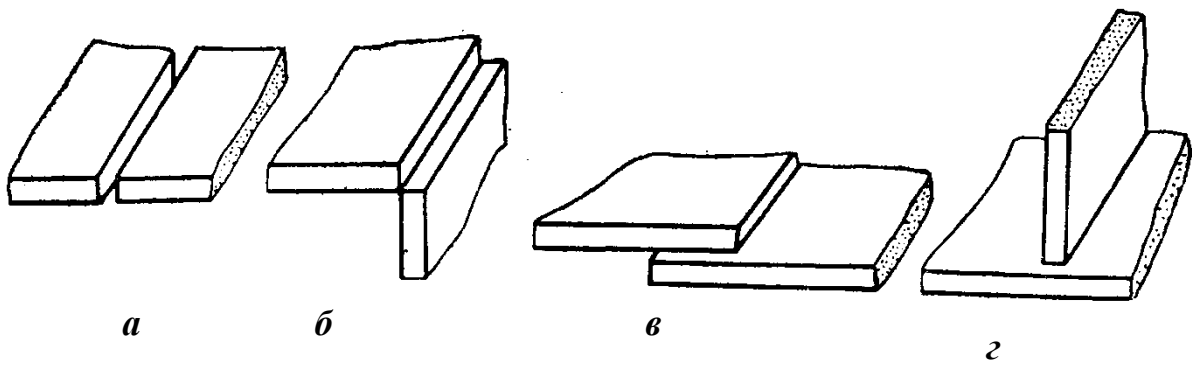


Рисунок 2 - Зварні з'єднання:

а — стикове; *б* — кутове; *в* — внапусток; *г* — таврове

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

Внапусток називається зварне з'єднання, в якому зварювані елементи розміщені паралельно і перекривають один одного.

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

Частина конструкції, в якій зварені елементи примикають один до одного, називається *зварним вузлом*.

Приклади зварних з'єднань, що виконуються при основних видах зварювання плавленням і тиском, наведені на рис. 3.

Зварний шов — ділянка зварного з'єднання, що утворилася в результаті кристалізації металу зварювальної ванни. Частина зварного шва, що перебуває при зварюванні в рідкому стані, називається зварювальною ванною.

При зварюванні без додаткового металу розплавляється лише основний метал. Метал, призначений для введення у зварювальну ванну на додаток до розплавленого основного металу, називається присаджувальним металом.

Розплавлені основний і присаджувальний метали, зливаючись, утворюють спільну зварювальну ванну. Межами зварювальної ванни є обплавлені ділянки основного металу і раніш утвореного шва.

Зварні шви можуть бути стиковими та кутовими (рис. 4). Стиковий шов — зварний шов стикового з'єднання. Кутовий шов—зварний шов кутового, таврового з'єднань та з'єднання внапусток.

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

З'єднання	Зварювання					
	Ручне дугове	Автоматичне під флюсом	Електронно-променево	Контактне		
				стикове	точкове	шовне
Стикове						
Таврове						
Напущіткове						
Кутові						

Рисунок 3 - Зварні з'єднання, що виконуються при основних видах зварювання

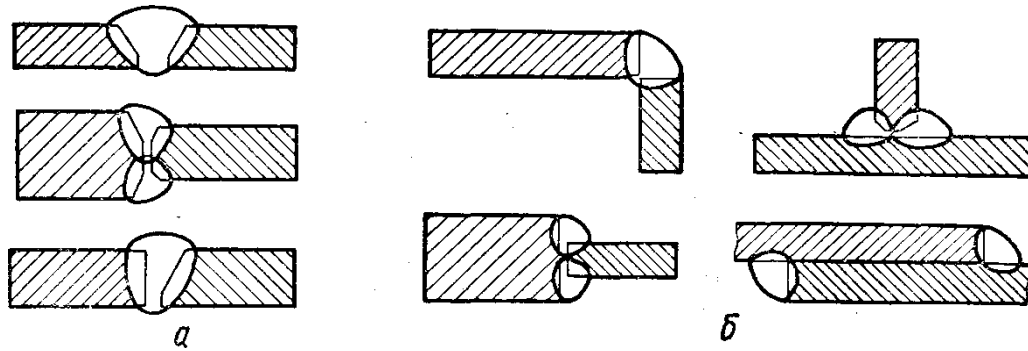


Рисунок 4 - Зварні шви:
a — стикові; *б* — кутові

На рис. 5 показано основні положення швів у просторі.

Щоб забезпечити якісний провар і формування зварного шва, кромки готують під зварювання. Елементи геометричної форми підготовки кромки під зварювання (рис. 6, *a*) — кут розчищення кромки α , кут β скосу однієї кромки γ , зазор b між кромками, що стикаються, притуплення кромки, тобто нескошена частина c торця кромки.

Елементи геометричної форми зварного шва (рис. 6, *б*) — ширина e та глибина h шва, глибина h_{np} провару, випуклість q (угнутість) шва.

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

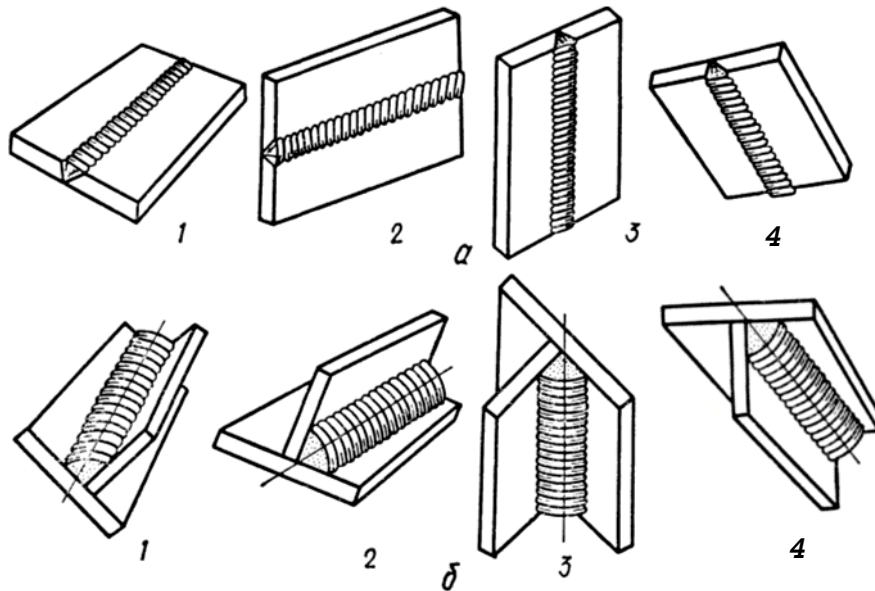


Рисунок 5 - Просторове положення зварних швів:
a - стикові; *б* - кутові; 1 - нижнє; 2 - горизонтальнє; 3 - вертикальнє; 4 - стельовє

Державні стандарти регламентують основні типи та конструктивні елементи швів зварних з'єднань: ГОСТ 5264-80 - для ручного дугового зварювання; ГОСТ 8713-79 - для автоматичного та механізованого

зварювання під флюсом; ГОСТ 14771-76 - для дугового зварювання в захисних газах; ГОСТ 15164—78—для електрошлакового зварювання; ГОСТ 15878—79—для контактного зварювання та ін. ГОСТ 2.312—72 встановлює графічне зображення та позначення зварних швів.

Щоб виготовляти зварні конструкції, використовується велика кількість зварювальних матеріалів які забезпечують якісний процес зварювання, формування, захист і заданий хімічний склад шва.

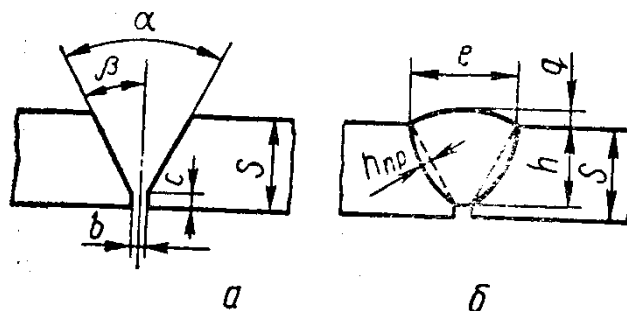


Рисунок 6 - Елементи геометричної форми підготовлених кромок під зварювання (а) та виконаного шва (б)

Зварювальні матеріали можна кваліфікувати так.

1. Ті, що безпосередньо беруть участь у створенні зварного шва. До них належать штучні плавкі електроди для ручного дугового зварювання, електродні дроти для зварювання в захисних газах, під флюсом і для електрошлакового зварювання, присаджувальні матеріали при різних способах зварювання плавленням; у меншій мірі беруть участь у формуванні складу швів флюси чи активні гази.

2. Такі, що безпосередньо не беруть участі у створенні металу шва. До них належать неплавкі електроди — вольфрамові, вугільні, графітові; інертні гази — аргон, гелій.

Зварювальні матеріали класифікуються також на металеві та неметалеві. До металевих зварювальних матеріалів належать зварювальні та наплавні дроти, стрічки суцільного перерізу та порошкові; електроди — покриті плавкі та вольфрамові неплавкі; додатковий присаджувальний метал у вигляді присаджувального дроту, гранульованих металевих порошоків.

До неметалевих зварювальних матеріалів належать флюси — плавкі й керамічні, захисні гази — інертні та активні; до цієї групи можна віднести вакуум як захисне середовище при зварюванні активних металів.

1.3 Зварюваність металів і сплавів

Зварюваність — властивість металу чи сполук металів утворювати при встановленій технології зварювання з'єднання, що відповідає вимогам, обумовленим конструкцією та експлуатацією виробу.

Розрізняють фізичну та технологічну зварюваність. *Фізична зварюваність* — властивість матеріалів створювати монолітне з'єднання з

хімічним зв'язком; таку зварюваність мають практично всі технічні сплави та чисті метали, а також ряд сполучень металів із неметалами.

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

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

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

Крім перелічених основних показників зварюваності є ще показники, від яких залежить якість зварних з'єднань. До них належать якість формування зварного шва, власні напруги, деформації й жолоблення зварюваних матеріалів і виробів.

Окислюваність металу при зварюванні визначається хімічними властивостями зварюваного матеріалу. Чим хімічно активніший метал, тим більша його схильність до окислення і тим вищою має бути якість захисту при зварюванні. До найактивніших металів, які легко окислюються при зварюванні, належать *Ti, Zr, Nb, Ta, Mo, W*. При їх зварюванні треба захищати від взаємодії з повітрям не лише розплавлений метал, а й основний метал, що примикає до зварювальної ванни, та шов, який остигає із зовнішнього боку. Найкращу якість захисту забезпечують високий вакуум та інертний газ високої чистоти.

Високою хімічною активністю при зварюванні відрізняються й інші кольорові метали: *Al, Mg, Cu, Ni* та сплави на їх основі; якість їх захисту забезпечується інертними газами, а також спеціальними електродними покриттями та флюсами.

При зварюванні сталей та сплавів на основі заліза від взаємодії з повітрям розплавлений метал захищають покриттями, флюсами, а також захисними газами.

Чутливість металу до теплової дії зварювання є одним з головних показників зварюваності. Метал у будь-якій зоні зварного з'єднання зазнає

нагрівання та наступного охолодження. Зміна температури металу під час зварювання називається термічним циклом зварювання. Максимальна температура нагрівання в різних зонах з'єднань різна: у шві перевищує її, в зоні плавлення — близька, в зоні термічного впливу — менша температури плавлення, поступово зменшуючись з віддаленням від шва.

При *нагріванні* в металі відбуваються такі структурні та фазові перетворення:

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

При *охолодженні* структурні та фазові перетворення йдуть у зворотному порядку:

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

Крім названих перетворень у металі в низькотемпературній зоні при зварюванні відбуваються структурні зміни, що викликають знеміцнення основного металу — рекристалізацію, старіння та ін.

Розглянемо термічний цикл і структуру зварного з'єднання при дуговому зварюванні низьковуглецевої сталі (рис. 7).

На рис. 7, *а* показано, як розподіляється максимальна температура у зварному з'єднанні, на рис. 7, *б* — схематичну структуру різних зон з'єднань, на рис. 7, *в, г* — зміну температури (термічні цикли) у цих зонах і властивості металу.

Кожний метал складається з дуже малих зерен. Ці зерна можна бачити на зломі. Сукупність усіх зерен металу називається його структурою. В металі розрізняють макро- і мікроструктуру. Макроструктуру видно неозброєним оком і при невеликих (до 10...15 разів) збільшеннях. Структура металу, що вивчається при збільшеннях більш ніж у 60...100 разів, називається мікроструктурою.

На ділянці 1 метал, що перебував у розплавленому стані, тверднучи, утворює зварний шов, який має литу структуру зі стовпчастих кристалів. Груба стовпчаста структура металу шва є небажаною, бо знижує міцність і пластичність металу.

Зона термічного впливу має кілька структурних ділянок, що різняться формою та будовою зерна, викликаних різною температурою нагріву в межах 450...1500 °С.

Ділянка неповного розплавлення 2 — перехідна від наплавленого металу до основного. На цій ділянці утворюється з'єднання і проходить межа сплавлення, це дуже обмежена зона (0.1...0.4 мм) основного металу, нагрітого до часткового оплавлення зерен. Тут спостерігається значне зростання зерен, накопичення домішок, тому ця ділянка звичайно найслабкіше місце зварного з'єднання з пониженою міцністю та пластичністю.

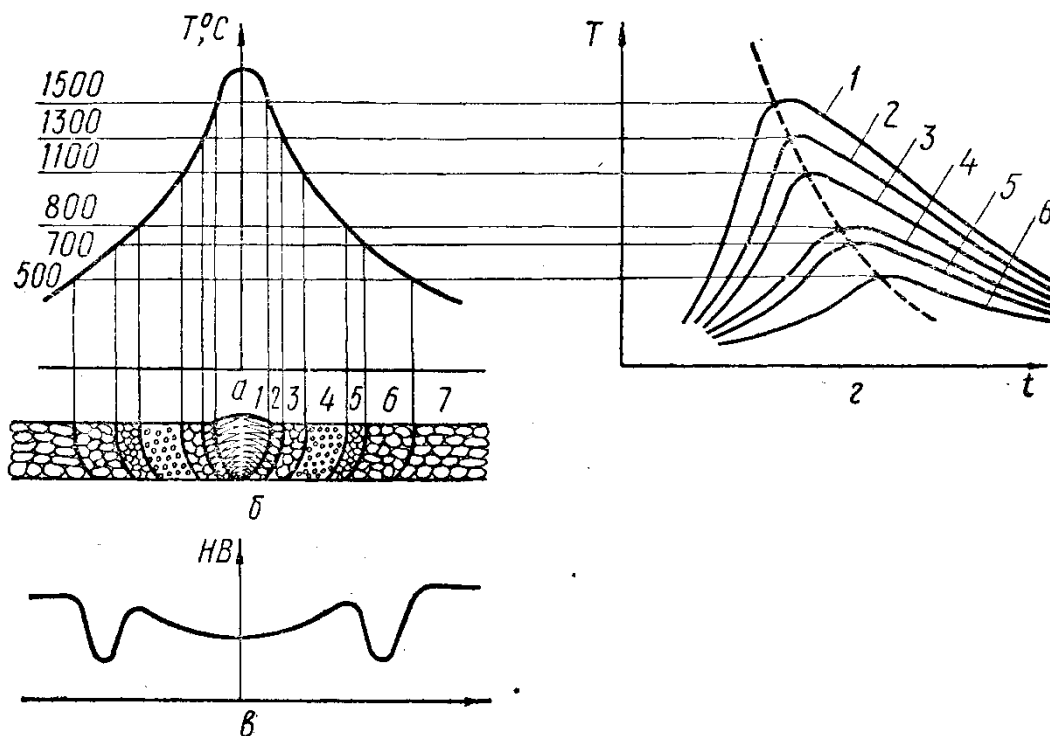


Рисунок 7 - Термічний цикл і схема зміни структури та властивостей зварного з'єднання низьковуглецевої сталі при однопрохідному зварюванні:

a — розподіл максимальних температур; *б* — схема зміни структури; *в* — зміна твердості; *г* — термічні цикли в характерних точках з'єднання

Ділянка перегріву 3 — зона основного металу, що нагрівається до температур 1100...1450 °С, в зв'язку з чим метал відрізняється крупнозернистою структурою та зниженими механічними властивостями (пластичністю та ударною в'язкістю). Ці властивості тим нижчі, чим крупніше зерно і ширша зона перегріву.

Ділянка нормалізації 4 — зона металу, що нагрівається до 900...1100 °С. Метал цієї ділянки має високі механічні властивості, бо при нагріванні та охолодженні на цій ділянці утворюється дрібнозерниста структура в результаті перекристалізації без перегріву.

Ділянка неповної перекристалізації 5 — зона металу, що нагрівається при зварюванні до 727...900 °С. У зв'язку з неповною перекристалізацією, що викликана недостатністю часу та температурою нагріву, структура цієї

ділянки характеризується сумішшю дрібних зерен, що перекристалізувалися, та крупних зерен, які ще не встигли перекристалізуватися. Метал цієї ділянки має нижчі механічні властивості, ніж метал попередньої ділянки.

Ділянка рекристалізації 6 — зона металу, що нагрівається до 450...727 °С. Якщо сталь перед зварюванням піддали холодній деформації (прокатування, кування, штампування), то на цій ділянці розвиваються процеси рекристалізації, що призводять до зростання зерен, огрублення структури і, як наслідок, до зменшення міцності.

Ділянка 7, що нагрівається до 200...450 °С, є зоною переходу від зони термічного впливу до основного металу. В цій зоні можуть проходити процеси старіння у зв'язку з випаданням карбідів заліза та нітридів, внаслідок чого механічні властивості металу цієї зони знижуються. Якщо метал перед зварюванням було відпалено, то істотних змін на ділянках 6 та 7 не відбувається.

Ширина зони термічного впливу залежить від товщини металу, виду та режимів зварювання. При ручному дуговому зварюванні вона становить звичайно 5...6 мм, при зварюванні під флюсом середніх товщин — близько 10 мм, при газовому зварюванні — до 25 мм.

Поряд із структурою під дією термічного циклу змінюються міцність і пластичність у різних зонах зварного з'єднання (рис. 7, в).

Як правило, чим вища міцність зварюваного матеріалу та більший ступінь його легування, тим чутливіший матеріал до термічного циклу зварювання і складніша технологія його зварювання.

Чутливість металу до теплового впливу зварювання оцінюють за властивостями різних зон з'єднань і зварних з'єднань у цілому при статичних, динамічних і вібраційних випробуваннях (розтяг, згин, визначення твердості, визначення переходу металу в крихкий стан та ін.), а також за результатами металографічних досліджень залежно від застосовуваних видів і режимів зварювання.

Опірність металу утворенню тріщин при зварюванні. При зварюванні можуть виникати гарячі та холодні тріщини в металі шва та в навколо-шовній зоні.

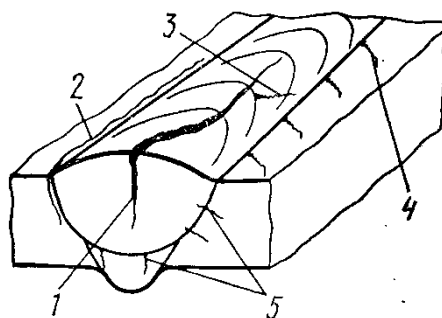


Рисунок 8 - Гарячі тріщини у зварних з'єднаннях:
 1, 2—поздовжні; 3, 4 — поперечні в шві та навколишній зоні;
 5 — поперечні по товщині зварюваного металу

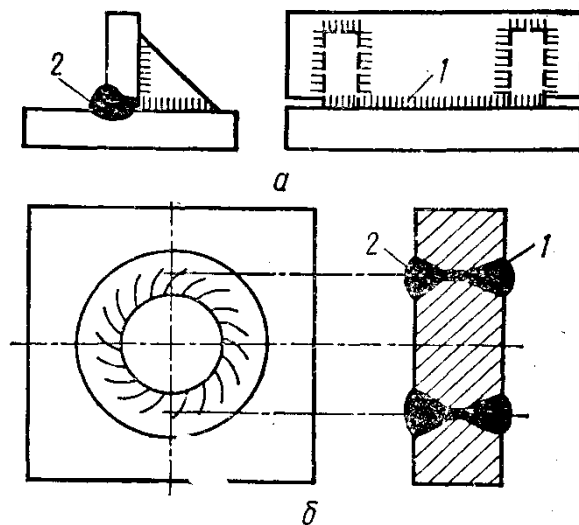


Рисунок 9 - Технологічні проби для визначення опірності зварних з'єднань утворенню гарячих тріщин:
 а — таврова з ребрами жорсткості; б — кільцева

Гарячі тріщини — крихкі міжкристалічні руйнування металу шва та навколишньої зони, що виникають у твердорідкому стані в процесі кристалізації, а також при високих температурах у твердому стані.

При кристалізації рідкий метал шва спочатку переходить у рідкотвердий, а потім у твердорідкий і, нарешті, у твердий стан. У твердорідкому стані утворюється каркас із кристалітів затверділого металу (твердої фази), у проміжках якого є рідкий метал, який в тому стані має дуже низьку пластичність і міцність.

Усадка шва та лінійне скорочення нагрітого металу у зварному з'єднанні при охолодженні можуть призвести до утворення гарячих тріщин. Гарячі тріщини можуть утворитися як уздовж, так і впоперек шва (рис. 8).

Для оцінювання зварюваності металів на опірність гарячим тріщинам застосовують два основних види випробувань — *технологічних проб* і *машинних досліджень*.

У *технологічних пробах* зварюють вузол чи зразок заданої жорсткості. Придатність матеріалу, електродів, режимів зварювання оцінюють за утворенням тріщини та її довжини. Прикладами технологічних проб можуть бути кільцева й таврова проби з ребрами жорсткості (рис. 9). Спочатку зварюють шов 1, потім 2, а потім візуально визначають, чи з'являється тріщина у другому шві.

При *машинних випробуваннях* розтягують чи згинають зразок під час зварювання. Стійкість матеріалів оцінюють за критичною величиною або за швидкістю деформування, при яких виникає тріщина. Для запобігання

виникненню гарячих тріщин треба правильно вибирати присаджувальний матеріал і технологію зварювання.

Холодні тріщини — локальні міжкристалічні руйнування, що утворюються в зварних з'єднаннях переважно при нормальній температурі, а також при температурах нижче 200 °С.

Причини холодних тріщин при зварюванні:

- збільшення крихкості металу внаслідок гартівних процесів при швидкому його охолодженні;
- залишкові напруги, що виникають у зварних з'єднаннях;
- підвищений вміст водню в зварних швах, який підсилює несприятливу дію перших двох причин.

Щоб оцінити зварюваність металу за опірністю холодним тріщинам, застосовують, як і при оцінюванні опірності гарячим тріщинам, два види випробувань — технологічні проби та методи кількісного оцінювання з прикладенням до зразків зовнішнього сталого механічного навантаження.

Перевагою технологічних проб є можливість моделювати технологію зварювання і, отже, робити висновок про опірність утворенню тріщин в умовах, близьких до реальних. Проба являє собою жорстке зварне з'єднання. Стійкість матеріалу оцінюють якісно за наявністю чи відсутністю тріщин. Прикладами проб можуть бути хрестова проба та проба Кіровського заводу (рис. 10).

У хрестовій пробі цифрами показана послідовність накладання швів. У найжорсткіших умовах перебуває останній четвертий шов, де й можливе утворення тріщин. У пробі Кіровського заводу, змінюючи товщину металу в зоні виточки, а також застосовуючи додаткове підігрівання чи охолодження, змінюють швидкість охолодження металу при зварюванні чи ступінь його підгартування. За цим показником судять про опірність металу утворенню холодних тріщин.

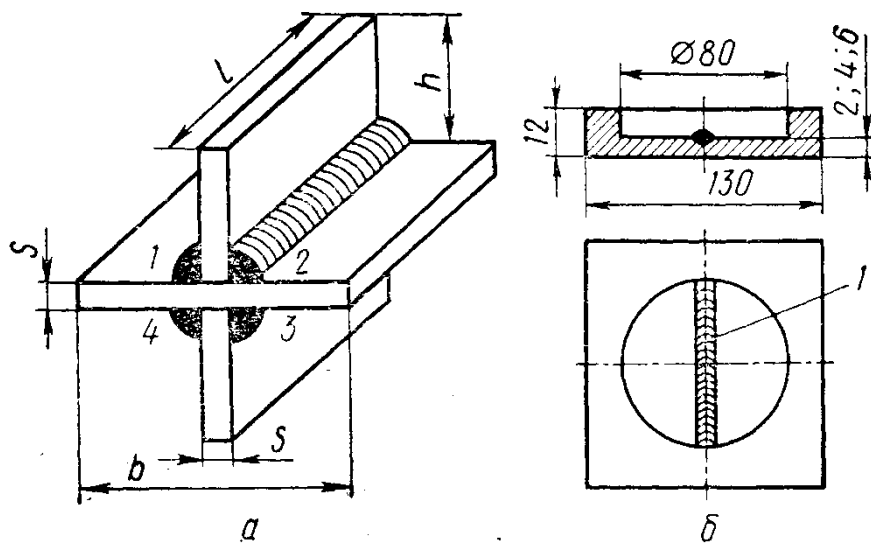


Рисунок 10 - Технологічні проби для визначення опірності зварних з'єднань утворенню холодних тріщин: а — хрестова; б

— Кіровського заводу; 1, 2, 3, 4 — послідовність накладання швів

Існують інші технологічні проби, в яких імітують жорсткі вузли зварних конструкцій. Проби дають лише якісну відповідність: утворюється чи не утворюється тріщина.

Кількісним критерієм оцінювання опірності зварного з'єднання утворенню холодних тріщин є мінімальні зовнішні напруги, при яких починають виникати холодні тріщини при витримуванні зразків під навантаженням, що прикладається відразу ж після зварювання. Зовнішні навантаження відтворюють дію на метал власних зварювальних і усадочних напруг, які виникають відразу після зварювання і постійно діють при зберіганні та експлуатації конструкції.

Методи боротьби з холодними тріщинами ґрунтуються на зменшенні ступеня підгартування металу, знятті залишкових напруг, обмеженні вмісту водню. Найефективнішим засобом для цього є підігрівання металу перед зварюванням.

Пори у зварних швах виникають при первинній кристалізації металу зварювальної ванни в результаті виділення газів. Пори являють собою заповнені газом порожнини у швах, і мають округлу, витягнуту чи складнішу форму. Пори можуть розташовуватися вздовж осі шва, його перерізу чи поблизу межі сплавлення. Вони можуть виходити чи не виходити на поверхню, розташовуватися ланцюжком, окремими групами чи поодинокі, можуть бути мікроскопічними чи великими (до 4...6 мм у поперечнику).

Причини виникнення пор: виділення водню, азоту чи оксиду вуглецю в результаті хімічних реакцій; різна розчинність газів у розплавленому й твердому металі; захоплення бульбашок газу при кристалізації зварювальної ванни.

Для зменшення пористості потрібна ретельна підготовка основного та присаджувального матеріалів під зварювання (очищення від іржі, масла, вологи, прогартування і т. д.), надійний захист зони зварювання від повітря, введення у зварювальну ванну елементів-розкислювачів (з основного металу, зварювального дроту, покриття, флюсу), додержання режимів зварювання.

Поряд із порами суцільність металу шва порушують *шлакові включення*. Шлакові включення пов'язані з тугоплавкістю, підвищеною в'язкістю та високою густиною шлаків, поганим зачищенням поверхні кромки та окремих шарів при багатошаровому зварюванні, затіканням шлаку в зазори між зварюваними кромками та в місця підрізів. Крім шлакових включень у шві можуть бути мікроскопічні оксидні, сульфідні, нітридні, фосфоровмісні вкраплення, які погіршують властивості зварного шва.

Технологія зварювання (вид зварювання, зварювальні матеріали, техніка зварювання) вибирається залежно від основного показника зварюваності (або поєднань кількох показників) для кожного конкретного матеріалу.

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

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

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

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

де вміст вуглецю та легуючих елементів подано в процентах.

Залежно від еквівалентного вмісту вуглецю та пов'язаною з цим схильністю до загартування та утворення холодних тріщин сталі за зварюваністю поділяють на чотири групи: добре, задовільно, обмежено та погано зварювані сталі (табл. 2).

Таблиця 2 – Класифікація сталей за зварюваністю

Група зварюваності	Сталь	
	вуглецева	конструкційна легована
1. Добра	Ст1, Ст2, Ст3, Ст4, сталь 08, 10, 15, 20, 25, 12кп, 15кп, 16кп, 18кп, 20кп	15Г, 20Г, 15Х, 15ХА, 20Х, 15ХМ, 14ХГС, 10ХСНД, 10ХГСНД, 15ХСНД
2. Задовільна	Ст5, сталь 30, 35	12ХН2, 12ХН3А, 14Х2МР, 10Г2МР, 20ХН3А, 20ХН, 20ХГСА, 25ХГСА, 30Х, 30ХМ
3. Обмежена	Ст6, сталь 40, 45, 50	35Г, 40Г, 45Г, 40Г2, 35Х, 40Х, 45Х, 40ХН, 40ХМФА, 30ХГС, 30ХГСА, 30ХГСМ, 35ХМ, 20Х2Н4А, 4ХС, 12Х2Н4МА

4. Погана	Сталь 65, 70, 75, 80 85, У7, У8, У9, У10, У11,У12	50Г, 50Г2, 50Х, 50ХН, 45ХНЗМФА, 6ХС, 7ХЗ, 9ХС, 8ХЗ, 5ХНТ, 5ХНВ
-----------	---	--

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

1.4 Підготовка металу під зварювання

Литі, ковані та штамповані заготовки звичайно надходять для зварювання у заданому розмірі. Але інша справа з деталями з прокату. Після підбору металу за розмірами та маркою сталі треба виконати такі операції: випрямлення, розмічання, різання, обробку кромки, гнуття та очищення під зварювання.

Випрямлення здійснюють місцевим пластичним деформуванням у холодному стані. Найчастішими видами деформацій листової сталі є хвилястість, місцеві випини та угнутості, заламані кромки, серповидність у площині листа.

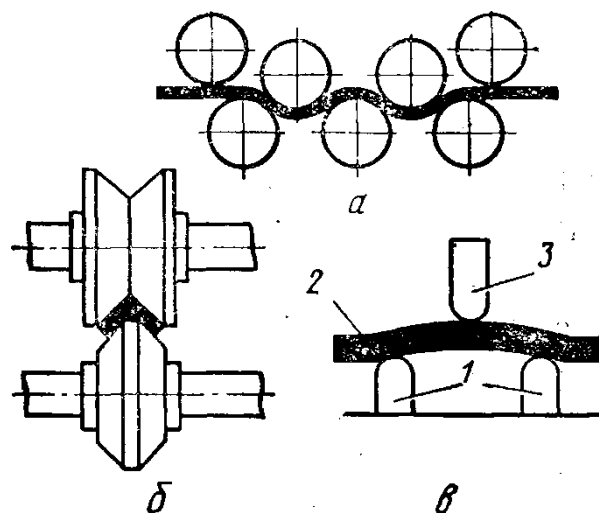


Рисунок 11 - Схема випрямлення листових і профільних елементів: *а* — на листопрямильних вальцях; *б* — у кутопрямильних вальцях; *в* — на пресі; *1* — опора; *2* — профіль; *3* — штовхач

Для випрямлення листів і смуг завтовшки від 0.5 до 50 мм використовують багатовалкові машини (кількість валків більша п'яти). Випрямляють за рахунок багаторазового згину при пропусканні листів між верхнім і нижнім рядами валків, розташованих у шаховому порядку (рис. 11, а). Листи завтовшки менш 0.5 мм випрямляють розтягуванням за допомогою пристроїв на пресах або на спеціальних розтяжних машинах. Дрібноту, середньосортовий, а також профільний прокат випрямляють на роликівих машинах (рис. 11, б), що працюють за схемою листопрямильної машини. Двотаври та швелери звичайно випрямляють згинанням на правильно-гнуттєвих пресах кулачкового типу (рис. 11, в).

При потребі створення значніших деформацій випрямлення та гнуття мають провадитися в гарячому стані.

Розмічання може бути індивідуальним (таке розмічання трудомістке) і за наміченим шаблоном. Намічання продуктивніше, проте виготовлення спеціальних намічальних шаблонів не завжди економічно доцільне. Оптичний метод за рисунком, що проектується на розмічувану площину, дає змогу розмічати без шаблону. Розмічально-маркувальні машини з пневмокерном виконують розмічання із швидкістю до 8...10 м/хв при похибці ± 1 мм. У цих машинах застосовують програмне керування. Використання пристрою для мірного різання прокату, а також машин для теплового різання з масштабною фотокопіювальною чи програмною системою керування дозволяє обійтися без розмічання.

Різання металу та обробка кромки. Механічне різання провадять на ножицях, на відрізних верстатах і в штампах на пресах. Для різання використовують ножиці листові з похилим ножем, висічні, дискові, комбіновані, прес-ножиці, сортові для різання кутика, швелера та двотавра, ручні пневматичні та електричні.

Листові деталі з прямолінійними кромками з металу завтовшки до 40 мм, як правило, ріжуть на гільйотинних ножицях і прес-ножицях. Дискові ножиці, різання якими здійснюється за рахунок круглих обертових ножів, дають змогу вирізувати листові деталі з непрямолінійними кромками завтовшки до 20...25 мм. Щоб дістати листову деталь заданої ширини з паралельними кромками, дискові ножі розміщують попарно на заданій відстані один від одного. При поперечному різанні фасонного прокату застосовують прес-ножиці та комбіновані ножиці з фасонними ножами. Відрізні верстати застосовують для різання труб, фасонного та сортового матеріалу.

На відрізних верстатах можна різати метал більших перерізів, ніж на ножицях, при цьому забезпечується вища якість розрізу. Проте трудомісткість різання на відрізних верстатах значно більша, ніж при різанні на ножицях. Тому відрізні верстати використовують для профілів, які неможливо різати на ножицях, наприклад, для різання труб, профілів великого перерізу, профілів під кутом або у випадках, коли треба забезпечити високу точність розрізу. Деталі зварних конструкцій

вирізають на відрізних верстатах з дисковими та стрічковими пилюками, трубовідрізних верстатах, на верстатах з абразивними кругами, в деяких випадках гладеньким диском за рахунок сил тертя. Продуктивним є процес вирубування в штампах заготовок під зварювання в масовому виробництві.

Термічне роздільне різання менш продуктивне, ніж різання на ножицях, але універсальніше і застосовується щоб дістати зварювані заготовки різних товщин як прямолінійного, так і криволінійного профілю.

Термічне роздільне різання ґрунтується на властивості металу згоряти в струмині технічно чистого кисню та видаленні продуктів згоряння з порожнини розрізу. Залежно від джерела теплоти, що використовується для різання, розрізняють газове різання, яке ґрунтується на використанні теплоти газового полум'я; дугове різання розплавленням з використанням теплоти електричної дуги, що звичайно, горить між розрізуваним металом і електродом; плазмодугове різання (різання стиснутою дугою) — особливий вид дугового різання, що ґрунтується на виплавленні металу з порожнини розрізу, спрямованим потоком плазми.

Метал із порожнини розрізу в процесі термічного різання видаляється одним із способів:

- термічним — за рахунок розплавлення та витікання металу з порожнини розрізу;
- хімічним — за рахунок окислення металу, його перетворення в оксиди та шлаки, які також видаляються з порожнини розрізу;
- механічним — за рахунок механічної дії струмини газу, що сприяє виштовхуванню рідких і розм'якшених продуктів з порожнини розрізу.

При газовому різанні одночасно діють усі три способи, при дуговому та плазмодуговому — переважно термічний та механічний.

Зараз поряд з газовим різанням усе ширше застосовують плазмодугове зварювання, що дозволяє оброблювати практично будь-які метали та сплави. Використання стиснутого повітря як плазмотвірного газу забезпечує не лише економічні, а й технічні переваги, бо поряд з високою якістю різання забезпечується значне підвищення швидкості різання, особливо металу малої та середньої товщини (до 60 мм).

Термічне різання поділяють на *ручне, механізоване та автоматичне*. Ручне та механізоване різання виконується за розміткою, автоматичне — за допомогою копіювальних пристроїв, за масштабним рисунком і на машинах з програмним керуванням. Масштабні рисунки — це креслення контуру вирізуваних деталей, зменшені в певному масштабі, що містять інформацію лише про траєкторію, тому початок кожного окремого розрізу доводиться здійснювати вручну. Використання машин із цифровим програмним керуванням дозволяє автоматизувати процес у межах усього листа без участі оператора при одночасному підвищенні точності розрізу. Для серійного виробництва в ряді випадків ефективно використовують різання листів пакетом сумарної товщини близько 100 мм. Починають

застосовувати лазерне різання, його переваги — надзвичайно невелика ширина розрізу (частки міліметра), точність розрізу, можливість різання металу незначної товщини (від 0.05 мм).

Кромки готують термічним та механічним способами. Кромки з одно- чи двобічним скосом можна дістати, використовуючи одночасно два чи три різакі, які розташовують під певними кутами. Механічна обробка кромки на верстатах виконується для забезпечення потрібної точності складання; для утворення фасок, які мають певний обрис; якщо технічні умови потребують видалення металу з поверхні кромки після різання.

Гнуття. Листові елементи завтовшки 0.5...50 мм для одержання циліндричних і конічних поверхонь згинають на листозгинальних вальцях з валками завдовжки до 13 м. При $R/S \geq 25$, де R — радіус вигину, S — товщина листа, згинають у холодному стані, при $R/S < 25$ — у гарячому. Листові елементи з поверхнею, що має просторову кривизну, дістають на спеціальних вальцях змінного діаметра.

При серійному та масовому виробництві для одержання елементів із поверхнею складного обрису широко використовують холодне штампування з листового матеріалу завтовшки до 10 мм. Висока продуктивність, точність розмірів і форми одержуваних заготовок, їх низька собівартість забезпечують створення досить технологічних штамповарних виробів. Для формоутворення елементів обмоток великих розмірів використовують штампування вибухом.

При гнутті профільного прокату й труб використовують ролико- та трубозгинальні верстати. Якщо є підстави порушення форми поперечного перерізу, доцільно використати спеціальні згинальні верстати з індукційним місцевим нагріванням ділянки, що деформується, заготовки, яка безперервно переміщується та згинається.

Щоб виготовити деталі з товстого листового металу, застосовують гаряче гнуття на згинальних вальцях і на пресах.

Очищення поверхні металу під зварювання застосовують для видалення з поверхні металу слідів консервації, забруднення, мастильно-охолодних рідин, іржі, окалини, облою, задирок і шлаку.

При зварюванні металу з неочищеною поверхнею виникають різні дефекти шва — пори й тріщини, а також погіршується формування шва. Для очищення прокату, деталей та зварних вузлів використовують механічні та хімічні методи. До механічних методів належать дробоструменева та дробометальна обробка, зачищення металевими щітками, голкофрезами, шліфувальними кругами та стрічками.

Дробоструменева та дробометальна очищення застосовують для листового і профільного прокату та зварних вузлів з метою очищення від окалини, іржі та забруднень при товщині металу 3 мм і більше. У дробоструменевих апаратах дріб викидається на очищувану поверхню крізь сопло за допомогою стиснутого повітря, у дробометальних апаратах — лопатками обертового ротора за рахунок відцентрової сили. Для

очищення застосовують шрот чавунний литий та колотий, сталевий литий, колотий, рублений розміром 0.7...0.9 мм при товщині металу до 4 мм; 0.9...1.6 мм — при товщині до 30 мм; 1.6—2.5 мм — вище 30 мм.

Дробоструменеве та дробометальне очищення здійснюють у камерах, обладнаних для розміщення й транспортування виробів, що очищуються, пристроями для збирання, очищення та повертання шроту в дробоструменевий апарат і для витягання забрудненого повітря. Заготовки та прокат перед зварюванням очищають звичайно дробометальним методом, зварні вузли (у важкодоступних місцях) — дробоструменевим.

Хімічними методами очищення знежирюють і травлять поверхні зварюваних деталей. Розрізняють ванний і струминний методи. У першому випадку деталі послідовно опускають у ванни з різними розчинами і витримують у кожній з них певний час, у другому — поверхню деталей оброблюють послідовно струменями розчинів різного складу, що дозволяє здійснити безперервний процес очищення. Хімічний спосіб очищення ефективний, проте у виробництві зварних конструкцій використовується головним чином для очищення кольорових металів.

Щоб запобігти корозії металу, крім очищення звичайно пасивують або ґрунтують поверхні, що дозволяє зварювати метал без видалення захисного покриття.

1.5 Контроль зварних з'єднань

Класифікація видів контролю зварних з'єднань. Зварні з'єднання вважають якісними, якщо вони не мають недопустимих дефектів і їх властивості задовольняють вимоги, що ставляться до них згідно з умовами експлуатації зварного вузла чи конструкції.

Існують такі види контролю якості зварних з'єднань - *попередній*, у процесі якого виконують перевірку якості вихідних матеріалів (зварюваного металу чи зварювальних матеріалів), підготовку деталей під зварювання та складання вузлів, а також стан оснастки зварювального обладнання та приладів, кваліфікацію складальників і зварників. На стадії попереднього контролю виконують випробування на зварюваність, що містять також механічні випробування, металографічні дослідження зварних з'єднань і випробування на опірність утворенню гарячих і холодних тріщин; *поточний* (у процесі виконання зварних робіт), що передбачає перевірку додержання технології зварювання, зачищення проміжних швів, заварювання кратерів; *заключний*, при якому готові зварні конструкції перевіряють згідно з вимогами, що ставляться до виробу.

Трудомісткість контрольних операцій може досягати 30% загальної трудомісткості виготовлення зварної конструкції.

Класифікація дефектів. У процесі утворення зварного з'єднання в металі шва та зоні термічного впливу можуть виникати дефекти, тобто відхилення від встановлених норм і вимог, що призводять до зниження міцності, експлуатаційної надійності, точності, а також погіршення

зовнішнього вигляду виробу. Дефекти зварних з'єднань розрізняють за причинами виникнення і за місцем їх розташування.

Залежно від причин виникнення їх можна поділити на дві групи. До *першої групи* належать дефекти, пов'язані з металургійними та тепловими явищами що відбуваються в процесі утворення, формування та кристалізації зварювальної ванни й остигання зварного з'єднання: гарячі та холодні тріщини в металі шва і навколишній зоні, пори, шлакові включення, несприятливі зміни властивостей металу шва та зони термічного впливу.

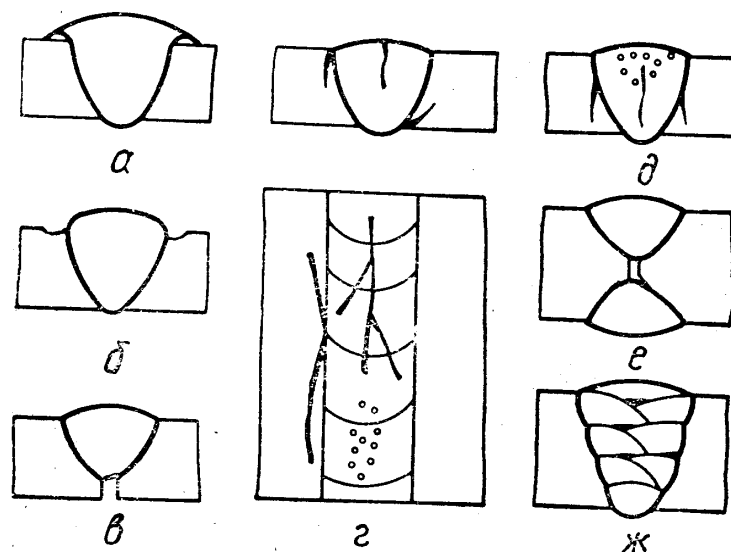


Рисунок 12 - Види дефектів у зварних з'єднаннях:

a — наплив; *б* — підріз; *в* — непровар; *г* — зовнішні тріщини і пори; *д* — внутрішні тріщини і пори; *е* — внутрішній непровар; *ж* — шлакові включення

До *другої групи* дефектів, які називаються дефектами формування швів, відносять дефекти, виникнення яких пов'язане в основному з порушенням режиму зварювання, неправильною підготовкою та складанням елементів конструкції під зварювання, несправністю обладнання та низькою кваліфікацією зварника й іншими порушеннями технологічного процесу. До дефектів цієї групи належать невідповідність швів розрахунковим розмірам, непровари, підрізи, пропали, напливи, незаварені кратери та ін.

За місцем розміщення розрізняють дефекти *зовнішні* та *внутрішні*. До *зовнішніх* належать дефекти, які можуть бути виявлені зовнішнім оглядом (дефекти формування шва, непровари, підрізи, напливи, пропали, кратери, тріщини та пори, що виходять на поверхню, і т.ін.).

Для виявлення внутрішніх дефектів (тріщин, пор) потрібні спеціальні методи неруйнівного та руйнівного контролю.

Дефекти дуже впливають на міцність зварних з'єднань і нерідко бувають причинами передчасного руйнування зварних конструкцій. Особливо небезпечні тріщини та непровари, що різко знижують міцність при циклічних навантаженнях. Деякі види дефектів показано на рис. 12.

Методи контролю якості зварних з'єднань. Залежно від того, порушується чи не порушується цілісність зварного з'єднання при контролі, розрізняють неруйнівні та руйнівні методи контролю.

До *неруйнівних методів* належать: зовнішній огляд; контроль на непроникність гідравлічним випробуванням, гасом, стиснутим повітрям, вакуумуванням, течешукачами; методи, що застосовуються переважно для виявлення дефектів, які виходять на поверхню зварних з'єднань (*магнітний, електромагнітний, люмінесцентний, кольоровий*); методи, що застосовують переважно для виявлення прихованих і внутрішніх дефектів (*радіаційний, ультразвуковий, магнітографічний*).

Зовнішній огляд служить для визначення зовнішніх дефектів зварних швів і невідповідності геометричних розмірів швів проектним (розміри швів і дефектів визначають вимірювальним інструментом та спеціальними шаблонами), подрізи, непровари, поверхневі тріщини та зовнішні пори, значна лускоподібність і нерівномірність шва, незаплавлені кратери, жолоблення виробу чи окремих його елементів. Зовнішній огляд провадять неозброєним оком або лупою не більш як 10-кратного збільшення. Зовнішнім оглядом контролюють усі зварні конструкції.

Випробуванню на непроникність піддають місткості для зберігання рідин, посудини та трубопроводи, що працюють при надлишковому тиску. При гідравлічному випробуванні місткості наповнюють водою, а в посудинах і трубопроводах створюють надлишковий тиск рідини, що перевищує в 1.5...2 рази робочий тиск. У такому стані виріб витримують протягом 5...10 хв. Шви оглядають з метою виявлення течі, крапель та спітніння. Цей спосіб випробування одночасно служить для оцінювання міцності конструкції.

При пневматичному випробуванні у посудини нагнітають стиснуте повітря під тиском, що перевищує атмосферний на 10...20 *кПа*, шви змочують мильним розчином або весь виріб занурюють у воду. Нещільності у швах визначають мильною бульбашкою чи бульбашками повітря у воді.

Вакуум-метод ґрунтується на створенні вакууму та реєстрації проникнення повітря крізь дефекти на одному, доступному для випробування, боці шва. Як пінявий індикатор використовують мильний розчин.

При випробуванні за допомогою гелієвого течешукача всередині посудини створюють вакуум, а ззовні шви обдувають сумішшю повітря з гелієм. При нещільностях гелій, що має виключно проникну здатність, проникає в посудину, звідки відсмоктується в течешукач із спеціальною

апаратурою для його виявлення. За кількістю вловленого гелію судять про нещільність швів.

При випробуванні *гасом* зварні шви з одного боку змащують гасом, а з іншого — крейдою. При нещільності на поверхні шва, пофарбованій крейдою, проявляються темні плями гасу. Високопроникна здатність гасу дозволяє виявити дефекти розміром 0.1 мм і менше.

Магнітні методи контролю ґрунтуються на виявленні поля магнітного розсіяння, що утворюється в місцях дефектів при намагнічуванні контрольованих виробів. Виріб намагнічують, замикаючи ним магнітопровід електромагніту чи вміщуючи всередину соленоїда. Потрібний магнітний потік можна створити пропусканням струму по витках (3...6 витків) зварювального дроту, що його намотують на контрольовану деталь. Залежно від способу виявлення потоків розсіювання розрізняють такі методи магнітного контролю: магнітного порошку, індукційний та магнітографічний.

При *методі магнітного порошку* на поверхню намагнічуваного з'єднання наносять магнітний порошок (окалина, залізні ошурки і т. ін.) у сухому вигляді (сухий спосіб) або суспензію магнітного порошку в рідині — гасі, мильному розчині, воді (мокрый спосіб). Над місцем розміщення дефекту створюється накопичення порошку у вигляді правильно орієнтованого магнітного спектра. Щоб полегшити рухливість порошку, виріб трохи обстукують. За допомогою магнітного порошку виявляють тріщини, невидимі неозброєним оком, внутрішні тріщини на глибині не більш як 15 мм, розшарування металу, а також великі раковини та шлакові включення на глибині не більш як 3...5 мм.

При *індукційному методі* магнітопотік у виробі наводять електромагнітом змінного струму. Дефекти виявляють за допомогою шукача, в котушці якого під дією поля розсіювання індукується ЕРС, що викликає оптичний або звуковий сигнал на індикаторі.

При *магнітографічному методі* поле розсіювання фіксується на еластичній магнітній стрічці, яка щільно притискується до поверхні з'єднання. Запис відтворюється на магнітографічному дефектоскопі. В результаті порівняння контрольованого з'єднання з еталоном роблять висновок про якість з'єднання.

Радіаційні методи контролю — надійні й розповсюджені методи, що ґрунтуються на спроможності рентгенівського та гамма-випромінювання проникати крізь метал. Виявлення дефектів при радіаційному просвічуванні ґрунтується на різному поглинанні рентгенівського чи гамма-випромінювання ділянками металу з дефектами чи без них, зварні з'єднання просвічують спеціальними апаратами. З одного боку шва на деякій відстані від нього розміщують джерела випромінювання, з протилежного боку щільно притискають касету з чутливою плівкою (рис. 13). При просвічуванні випромінювання проходить крізь зварне з'єднання й опромінює плівку. В місцях, де є пори,

шлакові включення, непровари, крупні тріщини, на плівці утворюються темніші плями. Вигляд і розміри дефектів визначають порівнянням плівки з еталонними знімками. Просвічування не дозволяє виявити тріщини, якщо вони розміщені не в напрямі центрального променя (кут більше як 5°), а також непровари у вигляді злипання зварюваних металів без газового чи шлакового прошарку.

Джерелами рентгенівського випромінювання служать спеціальні рентгенівські апарати (РУП-150-10, РУП-120-5-1), імпульсні апарати (ИРА-1Д, ИРА-2Д, РИНА-1Д та ін.). Рентгенопросвічуванням доцільно виявляти дефекти в металі завтовшки до 60 мм. При цьому фіксують дефекти, розміри яких становлять 1...3 % від товщини металу.

Поряд з рентгенографуванням, тобто експозицією на плівку, застосовують рентгеноскопію, тобто одержання сигналу про дефекти при просвічуванні металу на екрані. Екран покривають флуоресцентними речовинами (платиноціаністим барієм, сірчистим цинком та ін.), які світяться під дією рентгенівського випромінювання. У зв'язку з різним ступенем поглинання променів у різних ділянках металу світіння різне. Контроль рентгенівським випромінюванням з використанням екранів застосовують у поєднанні з телевізійними пристроями, що перетворюють рентгенівське зображення у видиме (установка типу РІ — рентгенотелевізійний інтроскоп). Чутливість рентгеноскопічного контролю не поступається рентгенографічному (1% і більше), а продуктивність вища. Перевагою рентгенографії є документ про якість з'єднання у вигляді плівки.

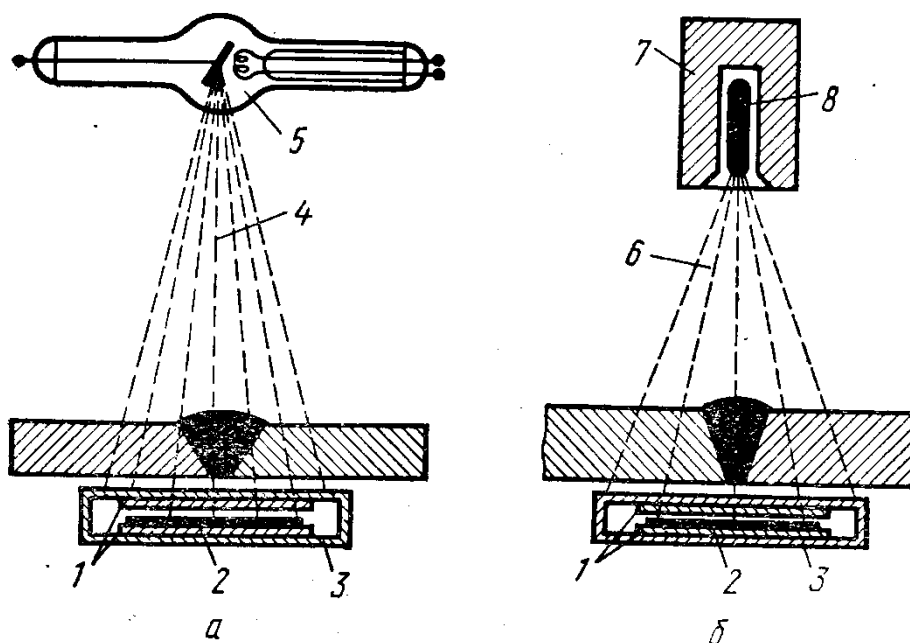


Рисунок 13 - Схема просвічування зварних швів:

a — рентгенівським випромінюванням; *б* — гамма-випромінюванням; *1* — підсилювальний екран; *2* — рентгенівська плівка; *3* — касета; *4* — рентгенівське випромінювання; *5* — рентгенівська трубка; *б*—гамма-випромінювання; *7* — свинцевий кожух; *8* — ампула радіоактивної речовини

При просвічуванні зварних з'єднань гамма-випромінюванням джерелом випромінювання служать радіоактивні ізотопи: кобальт-60, тулій-170, іридій-122 та ін. Ампулу з радіоактивним ізотопом вміщують у свинцевий контейнер. Техніка просвічування зварних з'єднань гамма-випромінюванням подібна до техніки рентгенівського просвічування. Цим способом виявляють аналогічні внутрішні дефекти — потемніння ділянок плівки, вміщеної в касету.

Гамма-випромінювання відрізняється від рентгенівського більшою жорсткістю та меншою довжиною хвилі, тому воно може проникати в метал глибше, ніж рентгенівське випромінювання, і дозволяє просвічувати метал завтовшки до 300 мм. Завдяки портативності апаратури гамма-випромінювання можна застосовувати у будь-яких умовах (у цехах, польових умовах, на монтажі і т. ін.). Крім того, просвічування гамма-випромінюванням менш дорогий спосіб.

Недоліками просвічування гамма-випромінюванням порівняно з рентгенівським є менша чутливість (при просвічуванні товщин до 50 мм виявляються відносно великі дефекти з розмірами більш 2...4 % товщини металу); неможливість регулювання інтенсивності випромінювання, що в рентгенівських апаратах регулюється напругою, яка підводиться; велика небезпека гамма-випромінювання при необережному поводженні з гамма-апаратами.

Ультразвуковий контроль ґрунтується на здатності ультразвукових хвиль відбиватися від поверхні поділу двох середовищ. В дефектоскопії застосовують п'єзоелектричний спосіб утворення ультразвукових хвиль, що ґрунтується на збудженні механічних коливань (вібрації) у п'єзоелектричних матеріалах (кварц, сульфат літію, титанат барію та ін.) при накладанні змінного електричного поля. Пружні коливання досягають максимального значення тоді, коли частота електричних коливань збігається з коливаннями п'єзопластини датчика, частоти ультразвукових коливань звичайно перевищують 20 000 Гц.

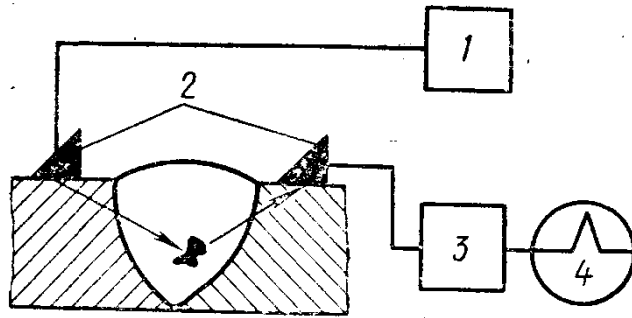


Рисунок 14 - Схема ультразвукового контролю:

1 — генератор ультразвукових коливань; 2 — п'єзоелектричний щуп; 3 — підсилювач; 4 — екран дефектоскопа

За допомогою п'єзометричного щупа ультразвукового дефектоскопа, що розміщують на поверхні зварного з'єднання, в метал надсилають спрямовані ультразвукові коливання (рис. 14). Ультразвук вводять у виріб окремими імпульсами під кутом до поверхні металу. При зустрічі з дефектом виникає відбита ультразвукова хвиля, що сприймається або іншим щупом (сприймальним у випадку двощупової схеми), або тим самим (подавальним при однощуповій схемі) під час паузи між імпульсами. Відбитий ультразвуковий сигнал перетворюється в електричний, підсилюється й подається на трубку осцилографа, де фіксується дефект у з'єднанні у вигляді піку на екрані осцилографа.

Ультразвуковий контроль має такі основні переваги: високу чутливість (1...2 %), що дозволяє виявляти, вимірювати та визначати місцезнаходження дефектів площею 1...2 мм²; велику проникну здатність ультразвукових хвиль, що дозволяє контролювати матеріали значної товщини (сталі до 2.5 м); можливість контролю всього зварного з'єднання лише з одного боку; високу продуктивність; відсутність громіздкого обладнання (прилади УЗД-7, УДМ-1М, ДУК-13ИМ та ін.).

Істотним недоліком ультразвукового методу є складність установлення виду дефекту.

Ультразвуковий контроль застосовують також як основний вид контролю та як попередній з наступним просвічуванням зварних з'єднань рентгенівським або гамма-випромінюванням.

До *руйнівних методів контролю зварних з'єднань* належать: механічні випробування, металографічні дослідження, спеціальні випробування з метою одержання характеристик зварних з'єднань.

Ці випробування проводять на зварних зразках, які вирізують із самого виробу або із спеціально зварених контрольних з'єднань, виконаних згідно з вимогами та технологією на зварювання виробів в умовах, що відповідають зварюванню. Метою цих випробувань є: оцінювання міцності та надійності зварних з'єднань і конструкцій; оцінювання якості основного

та зварювального матеріалів; оцінювання правильності обраної технології; оцінювання кваліфікації зварників.

Властивості зварного з'єднання порівнюють із властивостями основного металу. Результати вважаються незадовільними, якщо вони не відповідають заданому регламентованому рівню.

Одним з основних видів випробувань є *механічні випробування* за ГОСТ 6996—66, де передбачено такі види випробувань зварних з'єднань і металу шва:

- випробування зварного з'єднання (наплавленого металу, зони термічного впливу, основного металу) на статичний (короткочасний) розтяг, статичний згин, ударний згин (на надрізаних зразках), на стійкість проти механічного старіння;
- вимірювання твердості металу різних ділянок зварного з'єднання та наплавленого металу.

Випробуваннями на статичний розтяг визначають міцність зварних з'єднань. Випробуваннями на статичний згин визначають *пластичність* з'єднання за величиною кута згину до утворення першої тріщини в розтягнутій зоні. Випробування на статичний згин проводять на зразках з поздовжніми та поперечними швами зі знятим зусиллям шва врівень з основним металом. Випробуваннями на ударний згин, а також ударний розрив визначають *ударну в'язкість* зварного з'єднання. За результатами визначення твердості судять про структурні зміни та ступінь підгартування металу при охолодженні після зварювання.

Металографічні дослідження зварних з'єднань. Основним завданням металографічного аналізу є встановлення структури металу та якості зварного з'єднання, виявлення дефекту та його характеру. Металографічні дослідження містять у собі *мікро-* та *макроструктурний* методи дослідження металів.

При *макроструктурному методі* вивчають макрошліфи та злами металу неозброєним оком або лупою (збільшення до 20 разів). Макродослідження дозволяє визначити характер і розміщення видимих дефектів у різних зонах зварних з'єднань.

При *мікроструктурному аналізі (мікроаналіз)* досліджується структура металу при збільшенні в 50...2000 разів за допомогою оптичних мікроскопів. Мікродослідження дозволяє встановити якість металу, в тому числі виявити перепал, оксиди по межах зерен, засміченість металу неметалевими включеннями (оксидами, сульфідами), величину зерен металу, зміну складу металу при зварюванні, мікроскопічні тріщини, пори та інші дефекти структури.

Методика виготовлення шліфів для металографічних досліджень полягає у вирізуванні зразків із зварних з'єднань, шліфуванні, поліруванні та травленні поверхні металу спеціальними речовинами.

Металографічне дослідження зварних з'єднань доповнюється вимірюванням твердості і при потребі хімічним аналізом.

Спеціальні випробування проводять, щоб дістати характеристики зварних з'єднань, які враховують умови експлуатації зварної конструкції: визначення корозійної стійкості для конструкцій, що працюють у корозійних середовищах; міцності від утомленості при циклічних навантаженнях; повзучості при експлуатації в умовах дії підвищених температур і т. д.

Питання для самоперевірки

1. У чому полягає суть зварювання та як класифікуються види зварювання?
2. Що називається зварним з'єднанням і зварним швом?
3. Що розуміють під зварюваністю матеріалів? Назвіть основні показники зварюваності.
4. Які процеси складають підготовку металу під зварювання?
5. Як класифікують основні види контролю зварних з'єднань? Їх суть.

2 ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ РУЧНОГО ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ НЬОГО

2.1 Суть способу, обладнання, приладдя, інструмент

Найобсяжнішим серед інших видів зварювання є ручне дугове зварювання — зварювання плавленням штучними електродами, при якому подача електрода та переміщення дуги вздовж зварюваних кромок виконуються вручну. Схема процесу показана на рис. 15. Дуга горить між стержнем 1 електрода та основним металом 7. Під дією теплоти дуги електрод і основний метал плавляться, утворюючи металеву зварювальну ванну 4. Краплі 8 рідкого металу з електродного стержня, що розплавляється, переносяться у ванну через дуговий проміжок.

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

Металева та шлакова ванни разом утворюють зварювальну ванну. Із рухом дуги метал зварювальної ванни твердне й утворюється зварний шов 6. Рідкий шлак із остиганням утворює на поверхні шва тверду шлакову кірку 5, яка видаляється після остигання шва. Щоб забезпечити заданий склад і властивості шва, зварювання виконують покритими електродами, до яких висуваються спеціальні вимоги (див. п. 2.2).

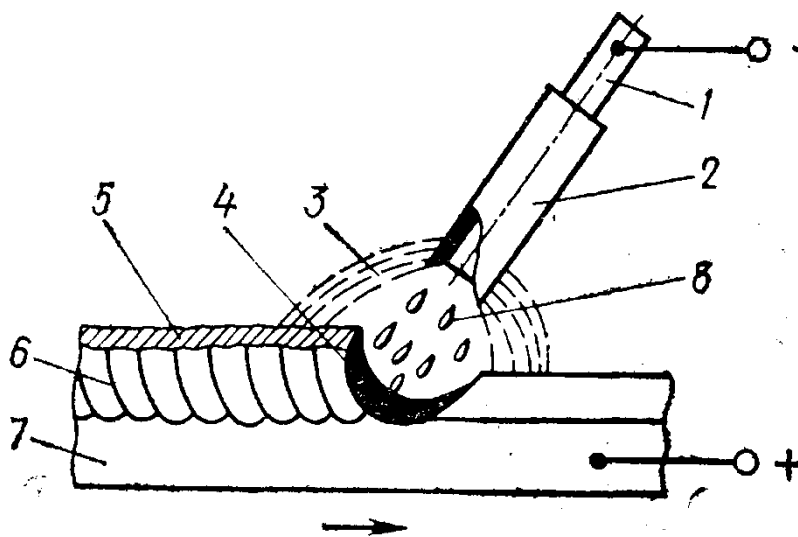


Рисунок 15 - Ручне дугове зварювання металевим електродом з покриттям (стрілкою показано напрям зварювання)

Зварювальний пост для ручного дугового зварювання оснащують джерелом живлення, струмопідводом, потрібними інструментами. Схема живлення дуги показана на рис. 16. Зварювальні пости можуть бути стаціонарними та пересувними.

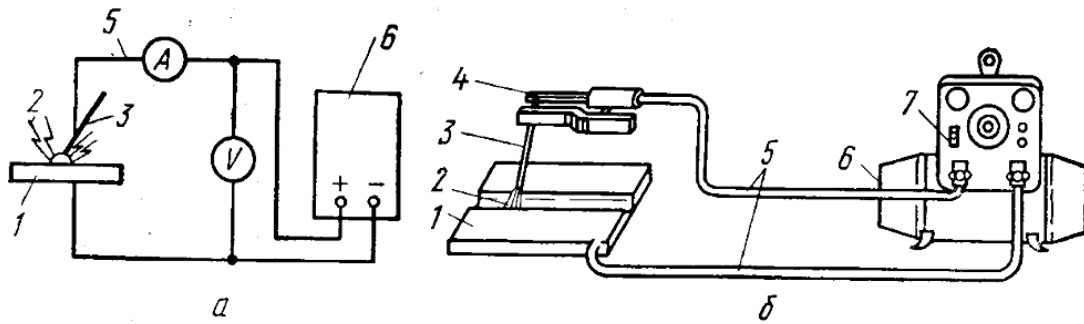


Рисунок 16 - Схема живлення дуги при ручному дуговому зварюванні (на постійному струмі):

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

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

Пересувні зварювальні пости, як правило, застосовують при монтажі великогабаритних виробів (трубопроводи, металоконструкції, посудини) та ремонтних роботах. При цьому часто використовують переносні джерела живлення.

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

Основним робочим інструментом зварника при ручному зварюванні є електродотримач, який служить для затискання електрода та підведення зварювального струму. Застосовують електродотримачі пружинного, пластинчастого та гвинтового типів (рис. 17).

Згідно з ГОСТ 14651—78 електродотримачі випускають трьох типів залежно від сили зварювального струму:

I типу — для струму до 125 А; II — 125...315 А; III — 315...500 А.

Для підведення струму від джерела живлення до електродотримача та виробу використовують зварювальні кабелі, переріз яких вибирають за встановленими нормативами для електротехнічних установок ($5...7 \text{ А/мм}^2$).

До допоміжних інструментів для ручного зварювання належать сталеві дротяні щітки для зачищення кромки перед зварюванням і для видалення з поверхні швів залишків шлаку, молоток-шлаковіддільник для видалення шлакової кірки, особливо з кутових і корневих швів при глибокому розчищенні, зубило, набір шаблонів для перевірки розмірів швів, сталеве клеймо для клеймування швів, метр, сталеві лінійка, висок, кутник, рисувалка, крейда, а також ящик для зберігання та перенесення інструмента.

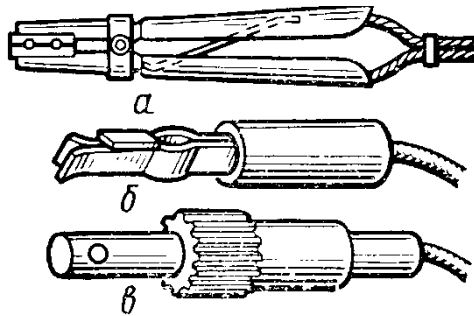


Рисунок 17 - Електродотримачі для ручного дугового зварювання:
a — пружинний; *б* — пластинчастий; *в* — гвинтовий

2.2 Стальний зварювальний та наплавний дріт і електроди

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

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

У легованій сталі легуючих елементів міститься від 2.5 до 10%, у високолегованій — більше ніж 10%.

Букви та цифри в написанні марок дроту позначають: Св — зварювальний, цифра після Св — вміст вуглецю в сотих частках процента (наприклад, 08 означає 0.08 % вуглецю); А—знижений, АА — ще більш знижений вміст сірки та фосфору; букви—умовні позначення легуючих елементів; цифри після буквених позначень— середній вміст легуючих елементів у процентах.

Хімічні елементи в сталях умовно позначаються так: алюміній (*Al*) — Ю, азот (*N*) — А (лише у високолегованих сталях), бор (*B*) — Р, ванадій (*V*) — Ф, вольфрам (*W*) - В, кремній (*Si*) — С, кобальт (*Co*) — К, марганець (*Mn*) — Г, мідь (*Cu*) — Д, молібден (*Mo*) — М, нікель (*Ni*) — Н, ніобій (*Nb*) — Б, титан (*Ti*) — Т, хром (*Cr*) — Х, цирконій (*Zr*) — Ц.

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

Дріт поставляється скрученим у мотки з внутрішнім діаметром від 150 до 750 мм, масою від 1.5 до 40 кг, а також намотаним на катушки та касети (для автоматичного та напівавтоматичного зварювання).

Стальний наплавний дріт за ГОСТ 10543—82 виготовляється діаметром від 0.3 до 8.0 мм: з вуглецевої сталі—9 марок (Нп-25, Нп-40 та ін.), з легованої сталі — 11 марок (Нп-40Г, Нп-50Г, Нп-30ХГСА та ін.), із високолегованої сталі — 11 марок (Нп-20Х14, Нп-30Х13, Нп-30Х10Г10Т та ін.). Дріт використовується для наплавлення під флюсом, у захисних газах, електрошлакового наплавлення та виготовлення покритих

електродів для ручного наплавлення. Марку дроту вибирають залежно від призначення та потрібної твердості наплавленого металу.

Електроди для ручного дугового зварювання. Плавкі електроди для ручного дугового зварювання — це стержні завдовжки до 450 мм із зварювального дроту, на які нанесено шар покриття — суміш речовин для підсилення іонізації, захисту від шкідливої дії повітря та металургійної обробки зварювальної ванни. У покриття входять такі компоненти:

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

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

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

- для зварювання вуглецевих і низьколегованих конструкційних сталей з тимчасовим опором розриву до 600 МПа стандарт передбачає дев'ять типів електродів (338, 342, 342А, 346, 346А, 350, 350А, 355, 360), що позначаються спільним індексом У;
- для зварювання легованих теплостійких сталей — тимчасовим опором розриву вище 600 МПа — п'ять типів (370, 385, 3100, 3125, 3150), індекс Л;
- для зварювання легованих теплостійких сталей — дев'ять типів, індекс Т;
- для зварювання високолегованих сталей з особливими властивостями—49 типів (ГОСТ 10052—75), індекс В;

- для наплавлення поверхневих шарів з особливими властивостями—44 типи (ГОСТ 10051—75), індекс Н.

Цифри у позначеннях типів електродів для зварювання конструкційних сталей означають гарантовану межу міцності металу шва.

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

Кислі покриття А (електроди АНО-2, СМ-5 та ін.) складаються в основному з оксидів заліза та марганцю (звичайно у вигляді руди), кремнезему, феромарганцю. Електроди з кислим покриттям технологічні, проте оксиди марганцю роблять їх токсичними.

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

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

Основні покриття Б (електроди УОНИ-13/45, УП-1/45, ОЗС-2, ДСК-50 та ін.) не містять оксидів заліза та марганцю. Наприклад, покриття марки УОНИ-13/45 складається з мармуру, плавикового шпату, кварцевого піску, феросиліцію, феромарганцю, феротитану, рідкого скла.

Метал шва, виконаний електродом з основним покриттям, має більшу пластичність. Цими електродами зварюють відповідальні конструкції.

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

- з тонким покриттям ($D/d \leq 1.20$) — М;
- із середнім покриттям ($1.20 < D/d \leq 1.45$) — С;
- з товстим покриттям ($1.45 < D/d \leq 1.80$) — Д;
- з особливо товстим покриттям ($D/d > 1.88$) — Г.

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

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

позначення штучних електродів для зварювання та наплавлення сталей показано на рис. 18.

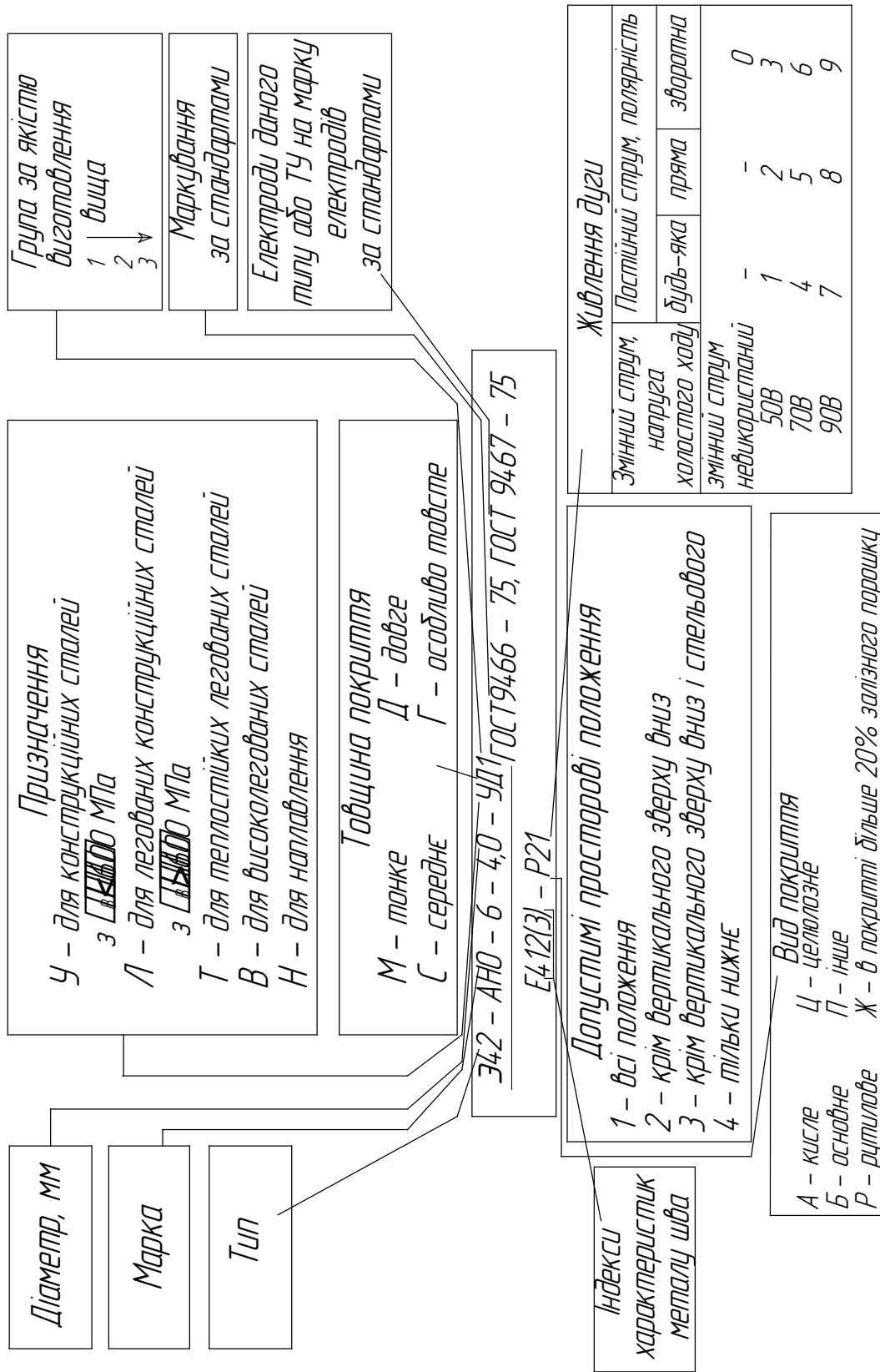


Рисунок 18 - Умовне позначення штучних електродів для зварювання та наплавлення сталей (згідно ГОСТ 9466 - 75)

2.3 Зварювальна дуга

Види зварювальних дуг. Джерелом теплоти при дуговому зварюванні є зварювальна дуга — стійкий електричний розряд у дуже іонізованій суміші газів та парів матеріалів, які використовуються при зварюванні, що характеризується густиною струму та високою температурою.

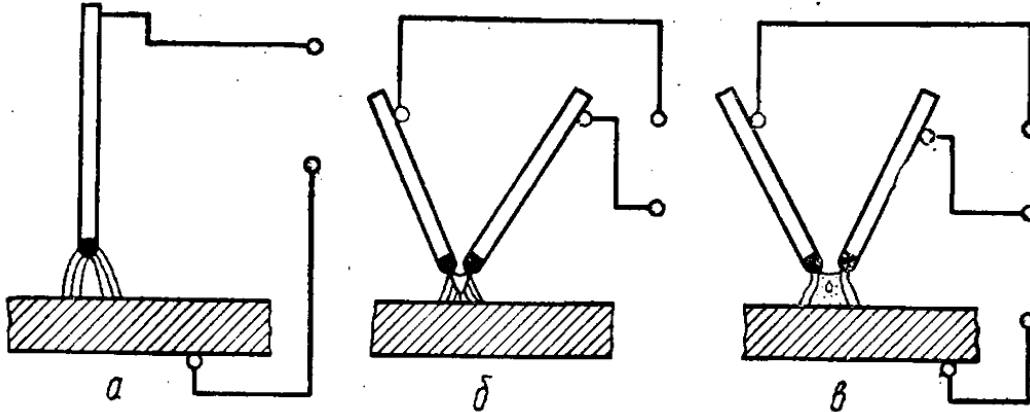


Рисунок 19 - Види зварювальних дуг:

a — прямої; *б* — посередньої; *в* — комбінованої дії (трифазна)

Залежно від числа електродів і способів увімкнення електродів та зварюваної деталі в електричне коло розрізняють такі види зварювальних дуг (рис. 19):

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

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

Залежно від матеріалу електрода розрізняють дуги між неплавкими електродами (вугільними чи вольфрамовими) та плавкими металевими електродами.

Зварювальна дуга має ряд *фізичних* і *технологічних* властивостей, від яких залежить ефективність використання дуги для зварювання. До фізичних властивостей належать електричні, електромагнітні, кінетичні, температурні, світлові.

До *основних технологічних властивостей* належать: потужність дуги, просторова стійкість, саморегулювання.

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

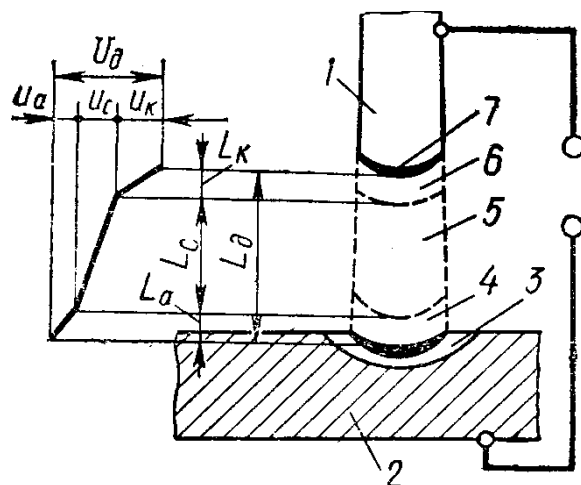


Рисунок 20 - Схема зварювальної дуги та падіння напруги в ній:
 1 - електрод; 2 - виріб; 3 - анодна пляма; 4 - анодна ділянка дуги; 5 - стовп дуги; 6 - катодна ділянка дуги; 7 - катодна пляма

У дуговому проміжку виділяють такі зони (рис. 20): катодну L_K та анодну L_a , де спостерігається значне падіння напруги, викликане утворенням біля електродів просторових зарядів (скупченням заряджених частинок), та розміщену між ними зону дугового розряду, що називається стовпом дуги L_c . На поверхні анода та катода утворюються електродні плями, що являють собою основу стовпа дуги, через які проходить увесь зварювальний струм. Електродні плями виділяються яскравістю світіння. Загальна довжина зварювальної дуги L_δ дорівнює сумі довжин усіх трьох зон:

$$L_\delta = L_K + L_c + L_a,$$

де L_δ — загальна довжина зварювальної дуги; L_K — довжина катодної зони, що дорівнює приблизно 10^{-5} см;

L_c — довжина стовпа дуги; L_a — довжина анодної зони, що дорівнює приблизно $10^{-3} \dots 10^{-4}$ см.

Загальна напруга зварювальної дуги відповідно складається із суми спаду напруги в окремих зонах дуги:

$U_\delta = U_K + U_c + U_a$, де U_δ , U_K , U_c , U_a — відповідно загальний спад напруги на дузі, в катодній зоні, стовпі дуги та анодній зоні, В.

Залежність напруги в зварювальній дузі від її довжини описується рівнянням $U_d = a + b \cdot L_d$, де a — сума спаду напруги в прикатодній та прианодній зонах, B ;

L_d — довжина стовпа дуги, mm ; b — питомий спад напруги в стовпі дуги, віднесений до $1 mm$ стовпа дуги, B/mm .

Теплова потужність дуги. Основною характеристикою зварювальної дуги як джерела енергії для зварювання є ефективна теплова потужність $q_{дж}$. Ефективна теплова потужність джерела зварювального нагріву — це кількість теплоти, введеної в метал за одиницю часу і витраченої на його нагрівання. Ефективна теплова потужність є частиною загальної теплової потужності дуги q , бо деяка кількість теплоти дуги непродуктивно витрачається на тепловідведення в металі, випромінювання, нагрівання крапель, що розбризкуються.

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

Повну теплову потужність зварювальної дуги, тобто кількість теплоти, що виділяється дугою за одиницю часу, наближено вважають рівною тепловому еквіваленту її електричної потужності $q = IU_d$, де I — величина зварювального струму, A ; U_d — спад напруги на дузі, B .

Відповідно ефективна теплова потужність визначається виразом $q_{дж} = IU_d \eta_{дж}$.

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

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

При утворенні зварювального шва ефективна теплова потужність дуги витрачається на розплавлення основного та присаджувального металів.

2.4 Джерела живлення для дугового зварювання

Стійкість горіння зварювальної дуги. До зварювальної системи при дуговому зварюванні входять джерело живлення, дуга та ванна розплавленого металу (виріб). Висока якість зварного з'єднання забезпечується в тому разі, коли вся система працює під час зварювання стійко, стабільно в усіх трьох його ланках і, насамперед, коли забезпечується стійке горіння дуги.

Проте в процесі зварювання на дугу, що переміщується по металу, діють фактори, які порушують її стійке горіння, такі, як зміна довжини

дуги (що залежить від кваліфікації зварника), якість складання, перенесення крапель рідкого металу до зварювальної ванни, зміна величини зварювального струму при коливаннях напруги в мережі, зміна швидкості зварювання, магнітне дугтя дуги (відхилення дуги під дією електромагнітних полів і феромагнітних мас) та інші фактори.

Стійкість дуги змінного струму нижча, ніж дуги постійного струму. Це пов'язане з тим, що при живленні дуги з частотою 50 Гц дуга 100 разів у секунду гасне і знову збуджується. Для підвищення стабільності горіння дуги в покриття та флюси вводять речовини (сполуки калію, кальцію, цезію та ін.), що сприяють кращій провідності дугового проміжку. Застосовують також спеціальні пристрої, так звані осцилятори та генератори імпульсів, які сприяють збудженню дуги синхронно з частотою живильної мережі.

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

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

Зовнішня характеристика джерела живлення та вольт-амперна характеристика дуги. Джерела струму для живлення зварювальної дуги мусять мати спеціальну зварювальну зовнішню характеристику.

Зовнішньою характеристикою джерела живлення називається залежність між напругою на його вихідних клеммах і струмом у зварювальному колі. Зовнішні характеристики (рис. 21) можуть бути таких основних видів: крутоспадна 1, пологоспадна 2, жорстка 3, зростаюча 4.

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

Вольт-амперною характеристикою (ВАХ) дуги називається залежність напруги дуги від зварювального струму (рис. 22). ВАХ має три зони — спадаючу I, жорстку II, зростаючу III. Це пов'язано з тим, що для дугового розряду опір не стала величина, бо кількість заряджених

частинок у ньому залежить від інтенсивності іонізації, головним чином від струму. Тому електрична дуга в газах не підпорядковується закону Ома і ВАХ є звичайно нелінійна. При малих струмах до 100 А (*I* зона) із збільшенням струму інтенсивно зростає число заряджених частинок (головним чином у результаті розігрівання та зростання емісії катода), опір стовпа дуги зменшується, тому падає потрібна для підтримання розряду напруга й характеристика дуги буде спадною. При подальшому зростанні струму (*II* зона) стовп дуги починає стискатися, об'єм газу, що бере участь у перенесенні заряду, зменшується, це призводить до меншої швидкості зростання числа заряджених частинок. Тому напруга дуги стає мало залежною від струму, а характеристика стає малоспадною та жорсткою. Ще далі збільшення струму характеризується сильним стисканням стовпа дуги (*III* зона), і вольт-амперна крива стає зростаючою, що вказує на збільшення енергії, яка витрачається всередині дуги.

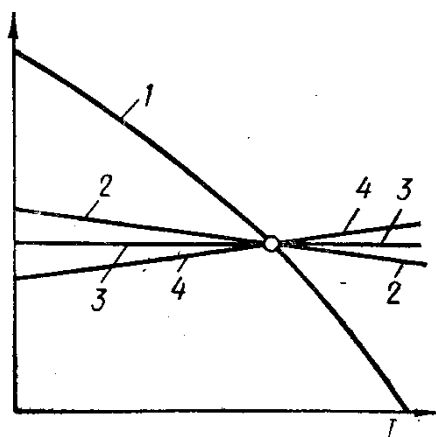


Рисунок 21 - Основні типи зовнішніх характеристик джерел живлення для дугового зварювання

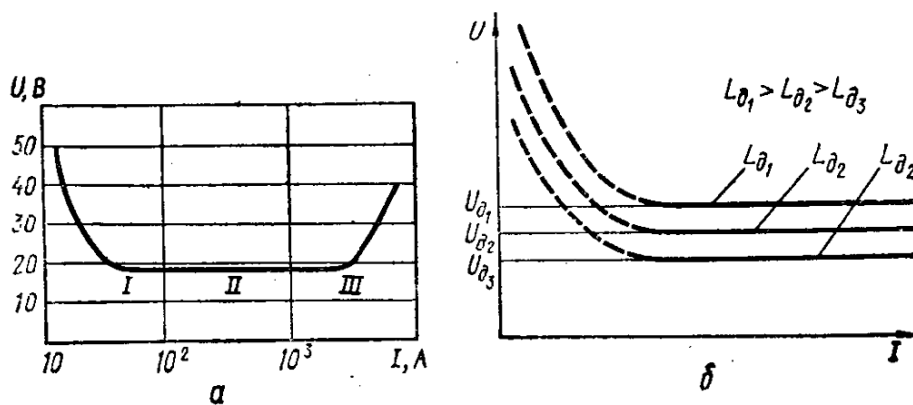


Рисунок 22 - Вольт-амперна характеристика дуги: а - загальний вигляд, б - залежність напруги дуги U_{δ} від її довжини L_{δ}

Зони *I* та *II* ВАХ відповідають режимам зварювання, що застосовують при ручному зварюванні плавким покритим електродом, а також неплавким електродом у середовищі захисних газів. Механізоване

зварювання під флюсом відповідає *II* зоні і частково захоплює *III* зону при використанні тонких електродних дротів і підвищеної густини струму, зварювання плавким електродом у захисних газах відповідає *III* зоні ВАХ. Для живлення дуги зі спадною чи жорсткою ВАХ застосовують джерела живлення зі спадною чи малоспадною зовнішньою характеристикою. Для живлення дуги зі зростаючою ВАХ застосовують джерела струму з жорсткою чи зростаючою зовнішньою характеристикою.

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

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

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

Основні технічні показники джерел живлення зварювальної дуги — зовнішня характеристика, напруга холостого ходу, відносна тривалість роботи (*TP*) та відносна тривалість вмикання (*TB*) у переривчастому режимі.

Величина *TP* визначається, як відношення тривалості робочого періоду джерела живлення до тривалості повного циклу роботи і виражається в процентах: $TP = (t_p/t_u) 100$, де t_p — безперервна робота під навантаженням (зварювання); t_u — тривалість повного циклу (зварювання + пауза). Оптимальна величина *TP* прийнята рівною 60 %. Різниця між *TP* та *TB* полягає в тому, що у першому випадку джерела живлення під час паузи не вимикаються від мережі і при розімкнутому зварювальному ланцюгу працюють на холостому ході, а в другому — джерела повністю вимикаються від мережі, що має місце при механізованому зварюванні.

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

Трансформатор складається з осердя — магнітопроводу з трансформаторної сталі, на якому розміщуються дві обмотки — первинна й вторинна. Змінний струм з мережі, проходячи через первинну обмотку трансформатора, намагнічує осердя, створюючи в ньому змінний

магнітний потік, який, перетинаючи витки вторинної обмотки, індукує в ній змінний струм.

Напруга індукованого струму залежить від числа витків вторинної обмотки: чим менше витків, тим напруга індукованого струму буде меншою і, навпаки, чим більше витків, тим напруга вища. Регулювання величини зварювального струму й створення зовнішньої характеристики забезпечується зміною потоку магнітного розсіяння або вмиканням у зварювальний ланцюг додаткового індуктивного опору. Відповідно до цього зварювальні трансформатори поділяють на дві основні групи.

До першої групи належать трансформатори з *підвищеним магнітним розсіянням*. Трансформатори цієї групи можна поділити на три основних види: трансформатори з магнітними шунтами, рухомими котушками та витковим (ступінчастим) регулюванням (ТС, ТД, СТШ, ТСК, ТСП).

До другої групи належать трансформатори з *нормальним магнітним розсіянням і додатковою котушкою — дроселем* (СНТ, ТСД).

Розглянемо будову трансформатора ТСК-500 (рис. 23) з підвищеним магнітним розсіянням, з рухомою котушкою, при переміщенні якої регулюється зварювальний струм. У нижній частині осердя *1* знаходиться первинна обмотка *3*, що складається з двох котушок розміщених на двох стержнях магнітопроводу. Котушки первинної обмотки закріплені нерухомо.

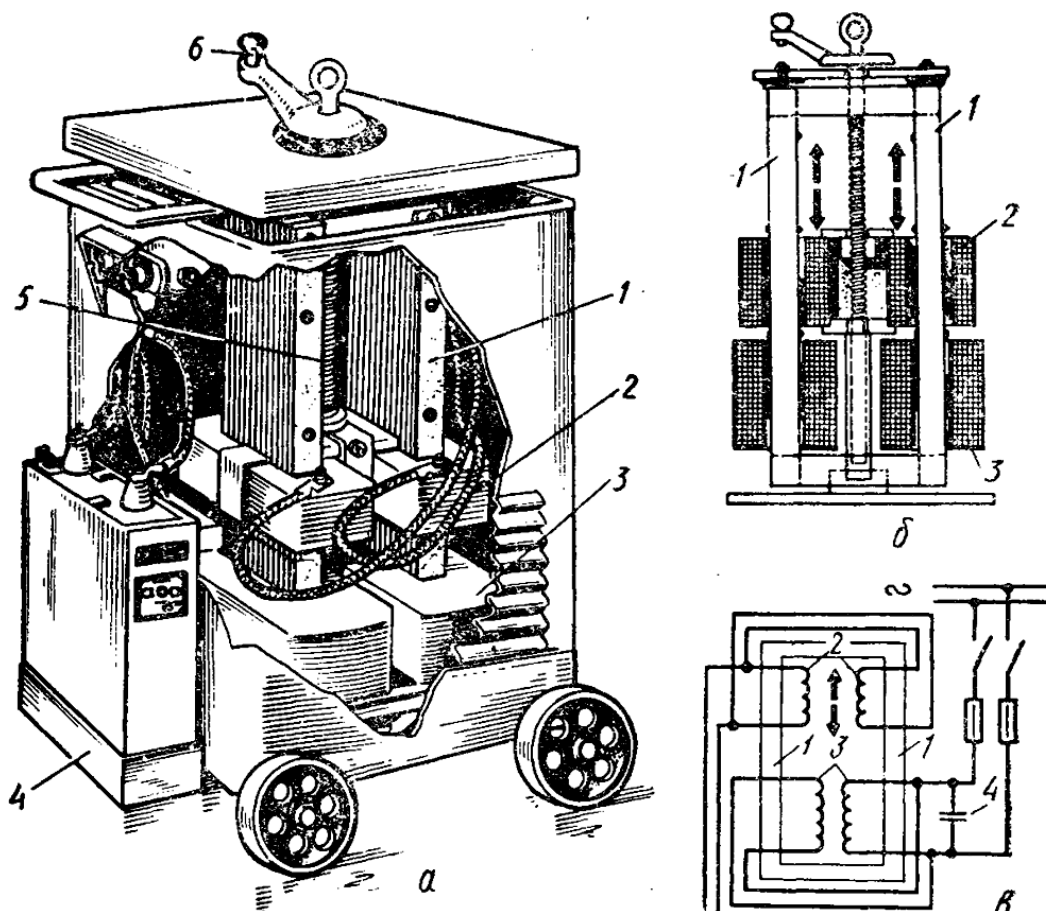


Рисунок 23 - Схема зварювального трансформатора ТСК-500:
а — зовнішній вигляд; *б* — схема регулювання зварювального струму; *в* — електрична схема

Вторинна обмотка 2, що також складається з двох котушок, розміщена на значній відстані від первинної. Котушки як первинної, так і вторинної обмоток з'єднані паралельно. Вторинна обмотка рухома і може переміщатися по осердю за допомогою гвинта 5, з яким вона зв'язана, і рукоятки 6, що знаходиться на кришці кожуха трансформатора.

Зварювальний струм регулюють зміною відстані між первинною та вторинною обмотками. При обертанні рукоятки 6 за годинниковою стрілкою вторинна обмотка наближається до первинної, магнітний потік розсіяння та індуктивний опір зменшуються, зварювальний струм зростає. При обертанні рукоятки проти годинникової стрілки вторинна обмотка віддаляється від первинної, індуктивний опір і магнітний потік розсіяння зростають і зварювальний струм зменшується. Межі регулювання зварювального струму 165...650 А.

Послідовне з'єднання котушок первинної та вторинної обмоток дозволяє діставати незначні зварювальні струми з межами регулювання 40...165 А. Для наближеного встановлення сили зварювального струму на кришці кожуха розміщена шкала з поділками. Точніше струм установлюють за амперметром.

Для підвищення коефіцієнта потужності зварювальний трансформатор ТСК-500 має у первинному ланцюгу конденсатор 4 — великої потужності.

Зварювальні випрямлячі. Це джерела постійного зварювального струму, що складаються із зварювального трансформатора з регульовальним пристроєм і блока напівпровідникових випрямлячів (рис. 24). Іноді в комплект зварювального випрямляча входить ще дросель, який вмикається в ланцюг постійного струму. Дросель служить для створення спадної зовнішньої характеристики. Дія зварювальних випрямлячів ґрунтується на тому, що напівпровідникові елементи проводять струм лише в одному напрямі. Найуживаніші у зварювальних випрямлячах селенові та кремнієві напівпровідники. Зварювальні випрямлячі виконують переважно за трифазною схемою, переваги якої полягають у великій кількості пульсацій напруги та рівномірнішому завантаженні трифазної мережі.

Зварювальні випрямлячі мають ряд переваг перед перетворювачами з обертовими частинами. В них кращі енергетичні, динамічні та масові показники, вищий ККД, прості в обслуговуванні, надійніші, бо немає обертових частин, під час їх роботи немає шуму.

Зварювальні випрямлячі залежно від зовнішніх характеристик можна поділити на три типи: із крутоспадними (ВСС-300-3, ВСС-120-4, ВКС-550 та ін.), жорсткими (або малоспадними) характеристиками (ВС-200, ВС-300,

ВС-600, ВС-1000, ИПП-120, ИПП-300, ИПП-500, ИПП-1000) та універсальні (ВСУ-300, ВСУ-500). Універсальні випрямлячі забезпечують можливість одержання як жорстких, так і спадних зовнішніх характеристик, тому їх можна застосовувати для різних видів дугового зварювання. Цифра в марці випрямляча означає силу номінального струму при $TR = 60...65\%$.

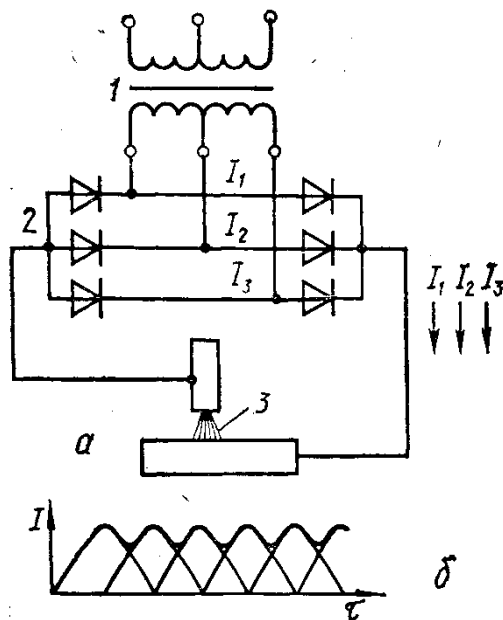


Рисунок 24 - Схема трифазного випрямляча:

a — схема вмикання; *б* — випрямлений струм зовнішнього ланцюга; *1* — знижувальний трансформатор; *2* — блок селенових або кремнієвих випрямлячів; *3* — зварювальна дуга

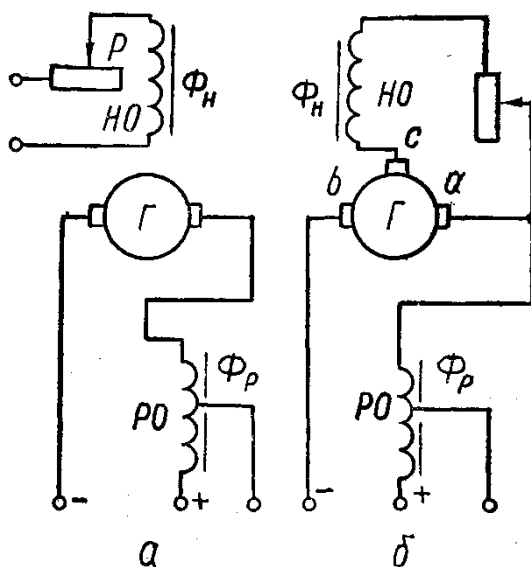


Рисунок 25- Принципова схема зварювального генератора:

a — з незалежним збудженням і розмагнічуючою послідовною обмоткою; *б* — із самозбудженням і розмагнічуючою послідовною обмоткою; *Г* — генератор; *Р* — реостат; *НО* —

намагнічуюча обмотка; PO — розмагнічуюча обмотка; a, b, c — щітки

Зварювальні генератори. Це спеціальні генератори постійного струму, зовнішня характеристика яких дозволяє одержати стійке горіння дуги, що досягається зміною магнітного потоку генератора залежно від зварювального струму. Зварювальний генератор постійного струму складається зі статора з магнітними полюсами та якоря з обмоткою та колекторами. Під час роботи генератора якір обертається в магнітному полі, що створюється полюсами статора. Обмотка якоря перетинає магнітні лінії полюсів генератора, і тому у витках обмотки виникає змінний струм, який за допомогою колектора перетворюється в постійний. Обертання якоря зварювального генератора забезпечується в зварювальних перетворювачах електродвигуном, а у зварювальних агрегатах двигуном внутрішнього згорання. До колектора притиснуті вугільні щітки, через які постійний струм підводиться до затискачів. До цих затискачів приєднують зварювальні проводи, що йдуть до електродотримачів і виробу.

Зварювальні генератори виконують за різними електричними схемами. Вони можуть бути зі спадною характеристикою (генератори ГСО у перетворювачах ПСО-300, ПСО-500 та ін.), із жорсткою та пологоспадною характеристикою ГСГ у перетворювачах ПСГ-500 та універсальні (перетворювачі ПСУ-300, ПСУ-500).

Найпоширеніші зварювальні генератори зі спадними зовнішніми характеристиками, що працюють за такими схемами:

- з незалежним збудженням і розмагнічувальною послідовною обмоткою;
- із самозбудженням і розмагнічувальною послідовною обмоткою.

Схема генератора з незалежним збудженням і розмагнічувальною послідовною обмоткою показана на рис. 24, *a*. Генератор має обмотку незалежного збудження HO , що живиться від окремого джерела постійного струму, та послідовну розмагнічувальну обмотку PO , яка ввімкнена у зварювальне коло послідовно з обмоткою якоря. Сила струму в колі незалежного збудження регулюється реостатом P . Магнітний потік Φ_n , що створюється обмоткою незалежного збудження HO , протилежний за своїм напрямом магнітному потоку Φ_p , який створюється розмагнічувальною обмоткою PO . Результируючий потік — це різниця потоків $\Phi_{рез} = \Phi_n - \Phi_p$.

Із збільшенням струму у зварювальному колі збільшуватиметься Φ_p , а Φ_n залишається незмінним, результируючий потік $\Phi_{рез}$, ЕРС та напруга на затискачах генератора падатимуть, створюючи спадну зовнішню характеристику генератора. Зварювальний струм у генераторах цієї системи регулюється реостатом P і секціонуванням послідовної обмотки, тобто зміною числа ампер-витків.

У генераторах із самозбудженням і розмагнічувальною послідовною обмоткою збудження (рис. 25, б) використовується принцип самозбудження. Напруга на намагнічувальну обмотку збудження HO знімається із щіток a та із самого генератора; ця напруга майже стала за величиною, тому магнітний потік Φ_n практично не змінюється.

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

2.5 Металургійні процеси при зварюванні плавленням

Плавлення металу. Електродний метал при дуговому зварюванні плавиться за рахунок теплоти, що виділяється на кінці електрода в приелектродній зоні дуги; теплоти, що попадає із стовпа дуги; нагрівання вильоту електрода при проходженні зварювального струму від струмопідводу та від дуги. Чим більший виліт електрода, тим більший його опір і тим більше виділяється теплоти.

Кінець електрода нагрівається до $2300...2500\text{ }^{\circ}\text{C}$, що й забезпечує його плавлення. На кінці електрода утворюються краплі розплавленого металу, які переносяться через дуговий простір у зварювальну ванну.

Краплі формуються на кінці електрода і переносяться під дією сил поверхневого натягу, сили тяжіння, тиску газів, що утворюються всередині розплавленого металу, тиску газового потоку, електростатичних і електродинамічних сил, реактивного тиску пари металу.

Залежно від співвідношення сил, що діють на краплю, характер переносу електродного металу може бути різним:

- *великокраплинним* (характерний для ручного дугового зварювання покритим електродом) або дрібнокраплинним (спостерігається при зварюванні під флюсом і в захисних газах — аргоні, вуглекислому газі та ін., рис. 26, а);
- *струминним* (при зварюванні в аргоні при струмах, величина яких більша, ніж деякі критичні значення, рис. 26, в); за рахунок коротких замикань (характерний для зварювання у вуглекислому газі, рис. 26, б).

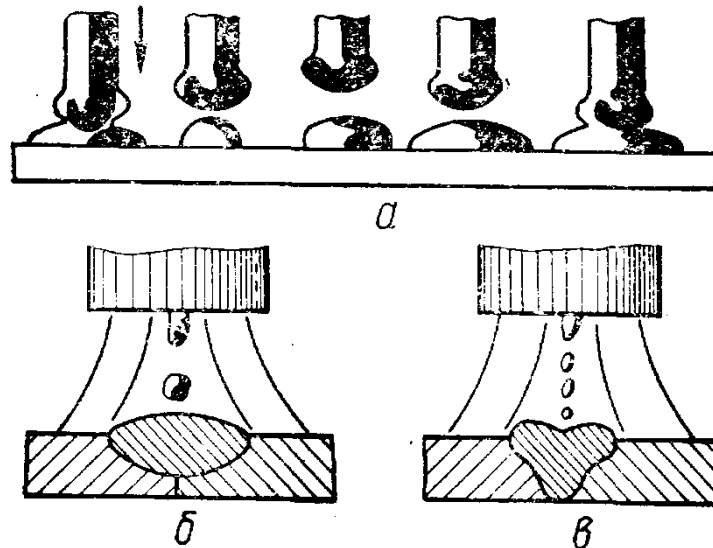


Рисунок 26 - Схема розплавлення та переносу електродного металу

Головними силами, що формують і утримують краплю на кінці електрода, є сили поверхневого натягу, які виникають на поверхні краплі і спрямовані всередину її.

Відрив краплі та її перенесення забезпечуються електродинамічними силами й тиском газових потоків. Ці сили збільшуються із зростанням зварювального струму, збільшення струму призводить до подрібнення крапель. Сила ваги краплі має істотне значення при малій густині струму і сприяє відриву та перенесенню крапель металу лише при зварюванні в нижньому положенні.

Перенесення електродного металу в дузі супроводжується викидом частини металу за межі зварювальної ванни розбризкуванням. Розбризкування пов'язане головним чином з електричним вибухом перемички між краплею, що відділяється, та торцем електрода під дією електродних сил.

Основний метал плавиться в результаті виділення теплоти в активній плямі (у приелектродній зоні) на поверхні виробу та теплоти стовпа дуги. Форма проплавлення (глибина та ширина) визначається концентрацією теплового та силового впливу дуги.

Основні компоненти силового впливу дуги:

- поверхневі сили — тиск, що викликається гальмуванням струменя плазми дуги об поверхню металу, реактивний тиск струменя пари з поверхні зварювальної ванни;
- об'ємна електродинамічна сила в рідкому металі.

Тиск осевого плазмового потоку викликається електромагнітними силами, його величина пропорційна квадрату струму. Дуга з плавким електродом виявляє більший силовий вплив на зварювальну ванну, ніж дуга з неплавким електродом. Сила тиску від газового потоку незначна і

складає близько 1 % сили тиску потоку, що викликається електромагнітними силами.

Процес проплавлення металу визначається тепловою й силовою дією дуги.

Формування та кристалізація зварювальної ванни. Формування зварювальної ванни відбувається під дією сили ваги розплавленого металу P_m , тиску джерела теплоти (наприклад, тиску дуги) $P_{дж}$ та сил поверхневого натягу P_n , що діють на поверхні металу (рис. 27). Характер дії цих сил залежить від положення зварювання.

При зварюванні в нижньому положенні наскрізним проплавленням рідка ванна втримується у висячому положенні силами поверхневого натягу P_n , які зрівноважують тиск, що впливає на ванну джерелом теплоти $P_{дж}$, та силу ваги P_m (маса рідкого металу):

$$P_n = P_m + P_{дж}$$

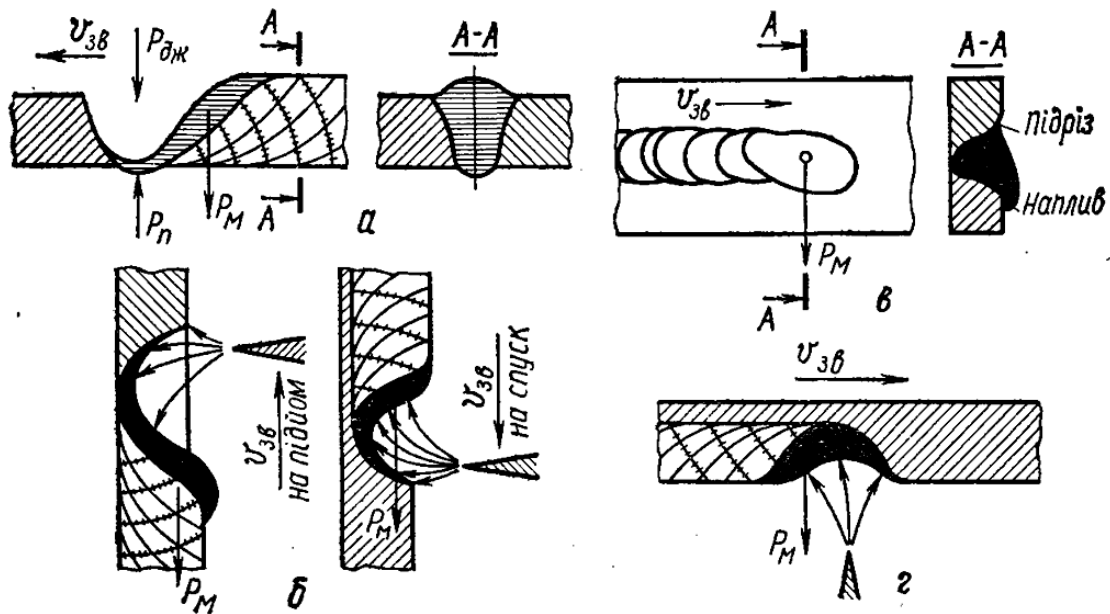


Рисунок 27 - Схема сил, що діють у зварювальній ванні, та формування шва в різних просторових положеннях:
a — нижнє положення; *б* — вертикальне; *в* — горизонтальне;
г — стельове; $v_{зв}$ — напрям зварювання

Коли сила ваги розплавленого металу та сила тиску джерела теплоти перевищать сили поверхневого натягу, тобто $P_{дж} + P_m > P_n$, поверхневий шар розірветься в проплав, і рідкий метал витече з ванни, створюючи пропал.

В умовах рухомої зварювальної ванни (під час зварювання) виникають додаткові гідродинамічні сили, викликані переміщенням розплавленого металу у хвостову частину ванни. Коли ж сили поверхневого натягу не можуть зрівноважити руйнівні сили, треба застосовувати спеціальні заходи — обмежувати об'єм зварювальної ванни,

застосовувати зварювання на підкладках, використовувати утримувальні пристрої. Збереження ванни від стікання має особливо важливе значення при зварюванні у вертикальному та стельовому положеннях. При зварюванні у вертикальному положенні процес можна вести зверху донизу (на спуск) і знизу вгору (на підйом). В обох випадках сила ваги ванни спрямована донизу за поздовжньою віссю шва. При зварюванні на спуск утриманню ванни від стікання сприяє тиск дуги та сили поверхневого натягу. При зварюванні на підйом ванна утримується лише силами поверхневого натягу. При зварюванні у вертикальному положенні для утримання ванни треба обмежувати теплову потужність і розміри ванни.

Виконання швів у стельовому положенні ускладнюється не лише небезпечністю стікання ванни. Виникає необхідність перенесення присаджувального металу у ванну в напрямі, протилежному дії сили ваги. При зварюванні в стельовому положенні ванна утримується силами поверхневого натягу та тиском дуги. Для утримання ванни в стельовому положенні також потрібно обмежувати її об'єм.

Дуже несприятливі умови формування шва при виконанні горизонтальних швів на вертикальній площині. Розплавлений метал ванни натікає на нижню зварювану кромку, що призводить до формування несиметричного підсилення шва, а також подрізів. При зварюванні горизонтальних швів ставляться жорсткі вимоги до скорочення розмірів зварювальної ванни.

Кристалізація металу зварювальної ванни. При зварюванні плавленням зварювальну ванну можна умовно поділити на дві ділянки: *головну*, де відбувається плавлення основного та додаткового металів, і *хвостову*, де відбувається тверднення розплавленого металу. Перехід металу зварювальної ванни з рідкого стану у твердий називається кристалізацією.

Відмінні особливості кристалізації зварювальної ванни:

- Джерело теплоти при зварюванні переміщується вздовж з'єднаних кромок, а разом із ним рухаються плавильний простір і зварювальна ванна. При дуговому зварюванні стовп дуги, розміщений у головній частині ванни, чинить механічний вплив (тиск) на поверхню розплавленого металу за рахунок удару заряджених частинок, тиску газів і дуття дуги. Тиск призводить до витискання рідкого металу з-під основи дуги та занурення стовпа дуги в товщу основного металу. Рідкий метал, витиснутий з-під основи дуги, із пересуванням дуги відкидається в хвостову частину зварювальної ванни. При віддаленні дуги відведення теплоти починає перевищувати приплив і починається тверднення — кристалізація зварювальної ванни. У процесі тверднення вздовж межі розплавлення утворюються спільні кристаліти, що й забезпечує монолітність з'єднання.

- Малий об'єм зварювальної ванни, який залежить від виду та режиму зварювання, і змінюється від 0.1 до 10 см³. Тому тепловідведення в холодний метал, що примикає, дуже велике, велика й швидкість кристалізації.
- Значне перегрівання розплавленого металу та його інтенсивне перемішування.
- Кристалізація металу зварювальної ванни при зварюванні плавленням починається в основному від готових центрів кристалізації — частково обплавлених зерен основного металу. Метал шва, виконаного зварюванням плавленням, має стовпчасту будову, бо складається з витягнутих (стовпчастих) кристалітів, які ростуть при кристалізації у напрямі, протилежному тепловідведенню.

Металургійні реакції при зварюванні. При зварюванні без захисту розплавлений метал інтенсивно поглинає гази атмосфери, тому зварні шви мають низькі механічні властивості. Для ізоляції металу від повітря в процесі зварювання застосовують різні засоби захисту: електродні покриття, флюси, захисні гази, вакуум. Проте повністю ізолювати метал від повітря звичайно не вдається, самі засоби захисту також взаємодіють із металом, навіть інертний газ і вакуум, що містять певну кількість домішок. Хімічні реакції взаємодії розплавленого металу з газами та засобами захисту називаються *зварювальними металургійними реакціями*.

Виділяють дві основні зони чи стадії взаємодії розплавленого металу з газами та шлаком — *торець електрода* з краплями, що на ньому утворюються, та *зварну ванну*. Повнота перебігу металургійних реакцій залежить від температури, часу взаємодії, поверхні та концентрації реагуючих речовин.

Характерні умови металургійних реакцій при зварюванні, як і при кристалізації,— висока температура нагрівання, відносно малий об'єм розплавленого металу, короткочасність процесу.

Середня температура крапель електродного металу, що надходить до ванни, збільшується із збільшенням густини струму і становить при зварюванні сталей від 2200 до 2700 °С, тобто характеризується значним перегрівом. Температура зварювальної ванни при дуговому зварюванні також характеризується значним перевищенням над точкою плавлення, перегрів становить 100...500 °С. Висока температура сприяє високій швидкості перебігу реакцій, проте внаслідок великих швидкостей охолодження реакції при зварюванні звичайно не встигають завершитися повністю.

Металургійні реакції при зварюванні одночасно відбуваються в газовій, шлаковій та металевих фазах.

Взаємодія металу з газами. При дуговому зварюванні газова фаза зони дуги, що контактує з розплавленим металом, складається із суміші N₂, O₂, H₂, CO₂, CO, пари H₂O, а також продуктів їх дисоціації та пари металів

і шлаку. N_2 потрапляє в зону зварювання головним чином із повітря, джерелами O_2 та H_2 є повітря, зварювальні матеріали (електродні покриття, флюси, захисні гази, а також оксиди, поверхнева волога) та інші забруднення на поверхні основного та присаджувального металів. Нарешті, O_2 , H_2 та N_2 можуть міститися в надлишку в переплавленому металі. В зоні високих температур відбувається розпадання молекул газу на атоми (дисоціація). Молекулярний кисень, азот і водень розпадаються й переходять в атомарний стан $O_2 \rightleftharpoons 2O$, $N_2 \rightleftharpoons 2N$, $H_2 \rightleftharpoons 2H$. Активність газів в атомарному стані різко підвищується.

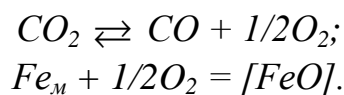
При контакті розплавленого металу, що міститься в газовій чи шлаковій фазі, відбувається розчинення O_2 у металі, а при досягненні межі розчинності — хімічна взаємодія з утворенням оксидів. Одночасно відбувається окислення домішок і легуючих елементів, що містяться в металі. В першу чергу окислюються елементи, що мають більшу спорідненість з O_2 . Наприклад, Ti окислюється за реакцією $Ti + O_2 = TiO_2$, Mn — за реакцією $Mn + O_2 = MnO_2$.

Залізо утворює з O_2 три сполуки (оксиди): FeO містить 22.27 % O_2 , Fe_3O_4 — 27.64 % O_2 , Fe_2O_3 — 30.06 % O_2 . Ці сполуки в металі знижують його міцнісні та пластичні властивості.

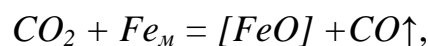
Азот розчиняється в більшості конструкційних матеріалів і з багатьма елементами утворює сполуки, які називаються нітридами. Із залізом він утворює нітриди Fe_2N (11.15 % N_2) та Fe_4N (5.9 % N_2), що викликає крихкість, пори та старіння сталей.

Водень також розчиняється в більшості металів. Метали, здатні розчиняти H_2 , можна поділити на дві групи. До першої належать метали, що не мають хімічних сполук з H_2 (Fe , Ni , Co , Cu та ін.). До другої групи належать метали (Ti , Zr , V , Ta , Pa , різкоземельні елементи та ін.), що утворюють із воднем хімічні сполуки, які називаються гідридами. Водень дуже шкідлива домішка, бо спричинює пори, мікро- та макротріщини у шві та в зоні термічного впливу.

Вуглекислий газ, що є в зоні дуги при зварюванні в CO_2 , активно окислює метал за реакцією, що проходить у дві стадії:



У сумарному вигляді реакція буде такою:



де $[FeO]$ — оксид заліза, що розчинився в залізі.

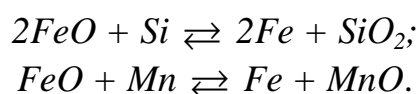
Оксид вуглецю CO , що утворився, в металі шва не розчиняється, в процесі кристалізації зварювальної ванни він видаляється й може утворювати пори. Вуглекислий газ застосовують для захисту зони зварювання при використанні елементів (Mn , Si) для розкислення, які нейтралізують окислювальну дію CO_2 .

Водяна пара, яка перебуває в газовій фазі, взаємодіє з рідким металом за рівнянням $H_2O + Fe = [FeO] + H_2$.

Основні способи боротьби зі шкідливим впливом газів — якісний захист і застосування елементів розкислювачів у зварювальних матеріалах.

Взаємодія металу із шлаками. При розплавленні електродного покриття, зварювального флюсу, сердечника порошкового дроту утворюється шлак. Основне призначення зварювального шлаку — ізоляція розплавленого металу від повітря. Окрім того флюси та покриття стабілізують дугу, сприяють якісному формуванню шва, здійснюють металургійну обробку розплавленого металу — його розкислення та легування.

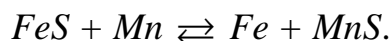
Характерними реакціями розкислення є реакції розкислення оксиду заліза (II) кремнієм і марганцем, що є у зварювальних флюсах і покриттях:



Оксиди кремнію та марганцю переходять у шлак.

Зварювальні матеріали поряд з окислювачами можуть містити шкідливі компоненти — *S* і *P*, які спричиняють гарячі тріщини та крихкість металу шва.

Сірка, сполучаючись із *Fe*, утворює сульфід заліза *FeS*. Метал очищають від *S*, вводячи активніший елемент, ніж зварюваний метал, за реакцією:



Сульфід марганцю менш розчинний у сталі, ніж сульфід заліза, що викликає перерозподіл сірки з розплавленого металу в шлак.

Хімічний склад металу шва. Хімічний склад металу шва та його властивості залежать від складу та частки участі у формуванні шва основного та електродного (присаджувального) металу, реакцій взаємодії розплавленого металу з газами атмосфери та захисними засобами. Метал шва при зварюванні чи плавким електродом, чи при застосуванні металевих присадок (дроту, порошку і т. п.) утворюється в результаті перемішування в ванні основного та електродного (присаджувального) металу. Частка основного металу (ψ_0) в шві залежить від виду з'єднання (з розчищенням кромки, без розчищення), виду та режиму зварювання і може бути визначена за відношенням площі, що зайнята основним металом у поперечному перерізі шва, до всієї його площі (рис. 28): $\psi_0 = F_o / (F_{np} + F_o)$, де F_o , F_{np} — площі, зайняті відповідно основним, електродним (присаджувальним) та наплавленим металом.

F_{np}

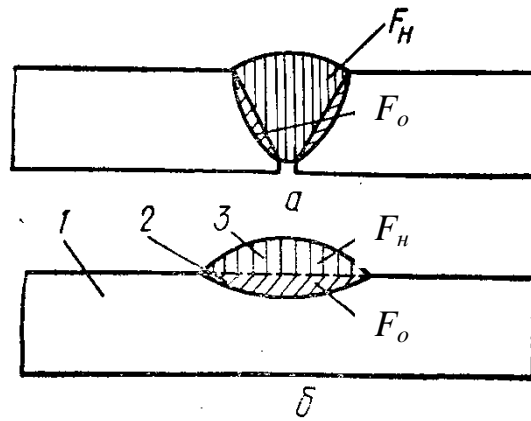


Рисунок 28 - Поперечний переріз шва:

a — стикове з'єднання; *б* — наплавлення; 1 — основний метал;
2 — проплавлений метал; 3 — наплавлений метал

При ручному дуговому зварюванні покритим електродом частина основного металу у шві становить: 0.15...0.40 — при наплавлянні валиків, 0.25...0.50 — при зварюванні кореневих швів, 0.25...0.60 — при зварюванні під флюсом.

Коли хімічних реакцій у зоні зварювання немає, вміст будь-якого елемента в металі шва (C_w) можна знайти за формулою:

$$C_w = C_o \psi_o + C_e(1 - \psi_o),$$

де C_o , C_e — вихідний вміст елемента в основному та електродному металі, ψ_o — частка основного металу. Наприклад, визначимо вміст нікелю в металі шва при дуговому зварюванні сталі, що містить 1.2 % Ni, з використанням електродного дроту з вмістом 1.5 % Ni (зварювання встик без розчищення). Приймаючи середнє значення $\psi_o = 0.3$, дістанемо:

$$C_w(Ni\%) = (1.2 \times 0.3) + [1.5 \times (1 - 0.3)] = 1.41 \%$$

Коли відбуваються хімічні реакції розплавленого металу з газами, покриттями, шлаковою ванною, склад металу шва визначають з урахуванням коефіцієнтів переходу, що показують, яка частка металу, що міститься в електродному дроті, переходить в метал шва

$C_w = C_o \psi_o + \eta \cdot C_e(1 - \psi_o)$, де η — коефіцієнт переходу, який змінюється в межах 0.3...0.95 залежно від хімічної активності елемента, виду та технології зварювання та ін.

2.6 Технологія ручного дугового зварювання

Вибір режиму ручного дугового зварювання. Під режимом зварювання розуміють сукупність контрольованих параметрів, що визначають умови зварювання. Параметри режиму зварювання поділяють на основні та додаткові. До основних параметрів режиму ручного зварювання належать діаметр електрода, величина, рід і полярність струму, напруга на дузі, швидкість зварювання. До додаткових належать

величина вильоту електрода, склад і товщина покриття електродів, положення електрода та положення виробу при зварюванні.

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

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

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

Сила струму в основному залежить від діаметра електрода, але також від довжини його робочої частини, складу покриття, положення зварного шва. Чим більший струм, тим більша продуктивність, тобто більша кількість наплавленого металу: $G = \alpha_n I_{зв} t$, де G — кількість наплавленого металу, г; α_n — коефіцієнт наплавлення, г/(А·год); $I_{зв}$ — сила зварювального струму, А; t — час, год.

Проте при надмірному струмі для даного діаметра електрода електрод швидко перегрівається вище допустимої межі, що призводить до зниження якості шва та підвищеного розбрикування. При недостатній силі струму дуга нестійка, часто обривається, в шві можуть бути непровари.

Силу струму можна визначити за такими формулами:

$I_d = (20 + 6d_e)d_e$ — при зварюванні конструкційних сталей для електродів діаметром 3...6 мм;

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

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

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

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

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

У процесі зварювання електроду надається рух у трьох напрямках.

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

Другий рух — переміщення електрода вздовж осі валика для утворення шва. Швидкість цього руху встановлюється залежно від сили струму, діаметра електрода, швидкості його плавлення, виду шва та інших факторів. Коли немає поперечних рухів електрода, дістаємо так званий нитковий валик, на 2...3 мм більший за діаметр електрода, або вузький шов завширшки $e \leq 1.5d_e$.

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

Поперечні коливальні рухи кінця електрода (рис. 29) визначаються формою розчищення, розмірами та положенням шва, властивостями зварюваного матеріалу, навичками зварника. Для широких швів, які дістають з поперечними коливаннями, $e = (1.5...5)d_e$.

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

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

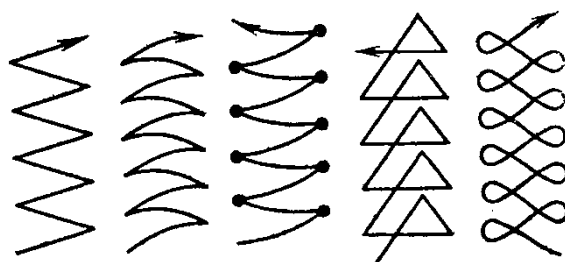


Рисунок 29 - Траєкторія руху кінця електрода при ручному дуговому зварюванні

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

Залежно від довжини шва, матеріалу, вимог до точності та якості зварних з'єднань зварювання таких швів може виконуватися по-різному (рис. 30).

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

При зворотноступінчастому методі весь шов розбивається на невеликі ділянки завдовжки по 150...200 мм, на кожній ділянці зварювання ведуть у напрямі, зворотному загальному напрямку зварювання. Довжина ділянок звичайно дорівнює від 100 до 350 мм. Залежно від кількості

проходів (шарів), потрібних для виконання проектного перерізу шва, розрізняють однопрохідний (одношаровий) та багатопрохідний (багатошаровий) шви (рис. 31).

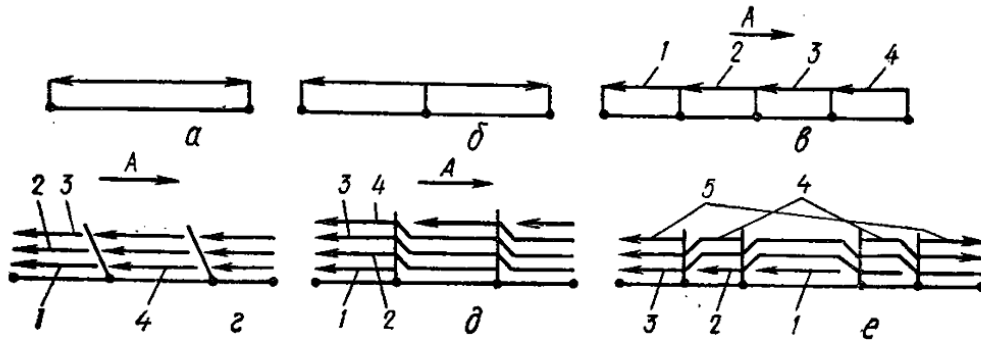


Рисунок 30 - Схеми зварювання:

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

З точки зору продуктивності найдоцільнішими є однопрохідні шви, які звичайно застосовують при зварюванні металу невеликих товщин (до 8...10 мм) з попереднім розчищенням кромки.

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

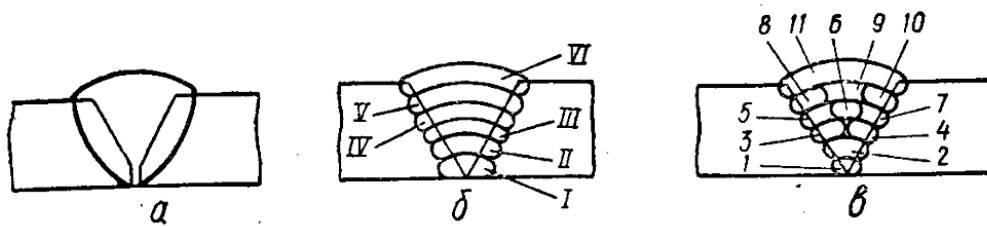


Рисунок 31 - Поперечні перерізи стикових швів:

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

При зварюванні «гіркою» спочатку в місце розчищення кромки наплавають перший шар металу невеликий завдовжки 200...300 мм, а потім другий шар, який перекриває перший і більший за нього вдвоє. Третій шар перекриває другий і довший за нього на 200...300 мм. Так наплавають шари доти, поки на невеликій ділянці над першим шаром місце розчищення кромки не буде заповнене. Потім від цієї «гірки» зварювання ведуть у різні боки короткими швами тим самим способом.

Отже, зона зварювання весь час перебуває в гарячому стані, що запобігає появі тріщин. «Каскадний» метод — різновид «гірки».

З'єднання під зварювання складають у пристроях, найчастіше з прихватками. Переріз прихвачувального шва становить приблизно $1/3$ перерізу основного шва, довжина його 30...50 мм. Кутові шви зварюють «у кут» або «у човник» (рис. 32). При зварюванні «у кут» простіше складання, допускається великий зазор між зварюваними деталями (до 3 мм), але складніша техніка зварювання, можливі дефекти типу підрізів та напливів, менша продуктивність, бо доводиться за один прохід зварювати шви невеликого перерізу (катет < 8 мм) і застосовувати багат шарове зварювання. Зварювання «у човник» продуктивніше, допускає більші катети шва за один прохід, але потребує ретельнішого складання.

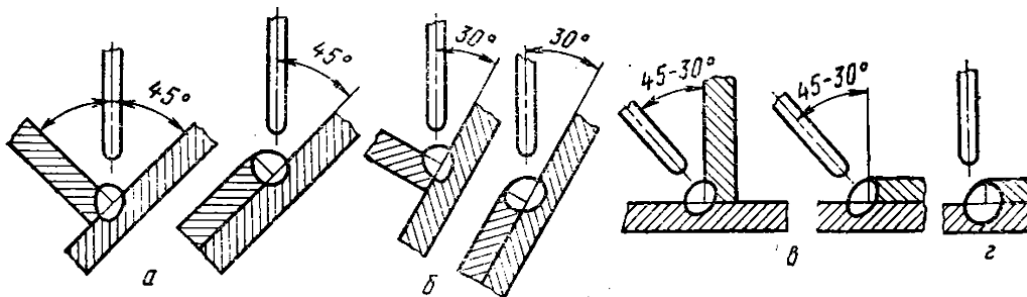


Рисунок 32 - Положення електрода та виробу при виконанні кутових швів: а — зварювання в симетричний «човник»; б — у несиметричний «човник»; в — «у кут» похилим електродом; г — з оплавленням кромки

Забезпечення нормативних вимог з технології та техніки зварювання—основна умова, щоб дістати якісні зварні шви. Відхилення розмірів і форми зварного шва від проектних найчастіше спостерігаються в кутових швах і пов'язані з порушенням режимів зварювання, неправильною підготовкою кромки під зварювання, нерівномірною швидкістю зварювання, а також із несвоєчасним контрольним обмірюванням шва.

Непроваром називають місцеву відсутність сплавлення між зварюваними елементами, між металом шва та основним металом або окремими шарами шва при багат шаровому зварюванні. Непровар зменшує переріз шва і викликає концентрацію напруг, тому може значно знизити міцність конструкції. Ділянки шва, де виявлено непровари, величина яких перевищує допустиму, слід видалити і знову заварити це місце. Непровар у корні шва в основному викликається недостатньою силою струму або підвищеною швидкістю зварювання, непровар кромки (несплавлення з кромками) — зміщенням електрода з осі стику, а також блуканням дуги, непровар між шарами — поганим очищенням попередніх шарів, більшим об'ємом наплавленого металу, натіканням розплавленого металу перед дугою.

Підрізом називають місцеве зменшення товщини основного металу біля межі шва. Підріз призводить до зменшення перерізу металу та різкої концентрації напруги тоді, коли він розташований перпендикулярно до діючих робочих напруг.

Напливом називають натікання металу шва на поверхню основного металу без сплавлення з ним.

Пропалом називають порожнину у шві, що утворилася в результаті витікання зварювальної ванни, що є недопустимим дефектом зварного з'єднання.

Кратером називають незаварене заглиблення, що утворюється після обриву дуги в кінці шва. У кратері, як правило, утворюються усадкові крихкості, які часто переходять у тріщини.

Опіками називають невеликі ділянки розплавленого металу на основному металі поза зварним швом.

Підрізи, натіки, напливи, пропали, незаварені кратери, шлак і бризки, що залишилися після зварювання, оплавлення кромки (у кутових швах) викликаються переважно надмірною силою струму та напруги на дузі, більшим різом потрібно діаметром електродів, неправильними маніпуляціями електродом, поганим складанням під зварювання, низькою кваліфікацією або недбалістю зварника.

Ручне дугове зварювання широко використовують у процесах наплавлення при відновленні спрацьованих поверхонь, відновлення браку лиття і для наплавлення поверхонь із спеціальними властивостями.

Наплавлення має ряд відмітних особливостей порівняно із з'єднувальним зварюванням. При наплавленні поверхневих шарів із заданими властивостями хімічний склад наплавленого металу істотно відрізняється від хімічного складу основного металу. Наплавлений метал вибирають з урахуванням експлуатаційних вимог і зварюваності.

Технологічними вимогами та особливостями наплавлення порівняно із з'єднувальним зварюванням є:

- мінімальне перемішування наплавленого шару з основним металом для забезпечення заданого хімічного складу шару та запобігання тріщин;
- забезпечення мінімальної зони термічного впливу;
- мінімальні деформації та напруги.

Ці вимоги забезпечуються за рахунок зменшення глибини проплавлення регулюванням параметрів режиму, погонної енергії, техніки наплавлення, коливаннями електрода, збільшення його вильоту, застосуванням широкої стрічки малої товщини, наплавленням симетричних шарів врозкид, їх проковуванням після наплавлення та іншими технологічними прийомами.

Техніка наплавлення має забезпечувати максимальну продуктивність наплавлення, тобто максимальну кількість розплавленого електродного (присаджувального) металу за одиницю часу.

Ручне дугове наплавлення виконують покритим плавким і неплавким електродами. Перед наплавленням плавким електродом поверхню деталі потрібно ретельно зачистити, після чого починають наплавляти метал окремими валиками. При цьому кожний наступний валик має розплавляти попередній на $1/3...1/2$ ширини. Електроди вибирають виходячи з умов експлуатації наплавлюваної поверхні. Продуктивність дугового наплавлення покритими електродами становить $0.8...3 \text{ кг/год}$.

Порошкові суміші наплавляють вугільним (графітовим) електродом постійним струмом прямої полярності. На очищену від забруднення поверхню насипають тонкий шар флюсу ($0.2...0.3 \text{ мм}$), найчастіше прожарену буру, потім шар шихти завтовшки $3...5 \text{ мм}$ та завширшки $20...60 \text{ мм}$. Дугу збуджують на основному металі, потім переносять на шихту, шихта розплавляється з мінімальним проплавленням основного металу.

2.7 Підвищення продуктивності ручного дугового зварювання

Продуктивність зварювання плавким електродом визначається коефіцієнтами розплавлення та наплавлення. Розплавлення присаджувального металу характеризується коефіцієнтом розплавлення:

$$\alpha_p = G_p / (I_{зв} t),$$

де α_p — коефіцієнт розплавлення, $г/(А \cdot год)$; G_p — маса розплавленого за час t електродного металу, $г$; t — час горіння дуги, $год$; $I_{зв}$ — зварювальний струм, $А$.

Кількість наплавленого металу або швидкість наплавлення визначається коефіцієнтом наплавлення:

$$\alpha_n = G_n / (I_{зв} t),$$

де α_n — коефіцієнт наплавлення, $г/(А \cdot год)$; G_n — маса наплавленого за час t металу, $г$ (з урахуванням втрат).

Різниця в коефіцієнтах α_p та α_n визначається втратами електродного металу на угар, розбризкування, випаровування та ін. Коефіцієнт цих втрат $\psi_{вт}$ визначається за формулою

$$\psi_{вт} = \frac{\alpha_{pn} - \alpha}{\alpha_p} 100\%$$

Коефіцієнти α_p , α_n , $\psi_{вт}$ залежать від виду, способу та параметрів режиму зварювання. При малих густинах струму (ручне дугове зварювання) значення коефіцієнтів розплавлення та наплавлення не перевищує $7...10 \text{ г/(А} \cdot \text{год)}$. Із збільшенням густини струму значення коефіцієнтів зростає до $17 \text{ г/(А} \cdot \text{год)}$ і більше. Коефіцієнт втрат для різних способів зварювання становить $1...5 \%$.

Продуктивність зварювання визначається кількістю розплавлюваного металу G_n за одиницю часу, а основний час зварювання за формулою

$$t_o = G_H / (\alpha_n I_{36}) = F_H \gamma / (\alpha_n I_{36}).$$

З формули випливає, що для зменшення основного часу потрібно намагатися, з одного боку, збільшувати зварювальний струм I_{36} та коефіцієнт наплавлення α_n , з другого — зменшувати поперечний переріз наплавленого металу F_H .

Струм та об'єм розплавленого металу збільшують застосуванням електродів великих діаметрів (6...10 мм), зварюванням пучком електродів, зварюванням спеціальними спареними електродами при використанні трифазної дуги. В усіх цих випадках збільшення струму досягається збільшенням сумарної площі поперечного перерізу електродних стержнів. Слід мати на увазі, що збільшення маси електрода та електродотримача збільшує втомлюваність зварника. З'являються труднощі із забезпеченням провару у вузьких місцях розчищення кромки і кутових швів. Ці способи доцільно використовувати при заварюванні дефектів лиття, заповнення місць розчищення товстостісного металу.

Підвищення продуктивності за рахунок збільшення коефіцієнта наплавлення α_n досягається застосуванням електродів з великим α_n та електродів, що містять залізний порошок у покритті. Електроди з залізним порошком містять у покритті до 50...60 % порошку (наприклад, ОЗС-6), тому зварний шов утворюється за рахунок розплавлення стержня та порошку покриття. При цьому коефіцієнт наплавлення збільшується до 12...18 г/(А·год), а продуктивність — в 1.5...2 рази.

Площу перерізу наплавленого металу F_H при заданій товщині зварюваного металу зменшують відповідним розчищенням кромки, наприклад застосуванням двобічного скошу кромки замість однібічного. Зменшення F_H за рахунок збільшення глибини та площі проплавлення досягається зварюванням методом опирання (з глибоким проварюванням зануреною дугою). Суть способу полягає в тому, що електрод опирають з легким натиском покриття об зварюваний метал під кутом 15...20° до вертикалі, переміщують кутом назад вздовж лінії накладання валика без поперечних коливань. Використовують електроди з підвищеною товщиною покриття. Зварювальний струм збільшують на 20...40%, за формулою $I_{36} = (60 \div 70)d_e$. Збільшена потужність зварювальної дуги, концентроване введення теплоти, швидке переміщення електрода під кутом та інтенсивне витиснення розплавленого металу зварювальної ванни з-під дуги тиском дуги створюють умови для глибокого провару при мінімальному розбризкуванні. Цей метод використовують при зварюванні в нижньому положенні стикових швів і кутових «у човник».

Підвищення продуктивності досягають також застосуванням зварювання похилим електродом і таким, який лежить, за рахунок того, що один робітник може одночасно обслуговувати 2-3 пости.

Питання для самоперевірки

1. У чому полягає суть ручного дугового зварювання плавким електродом? Назвіть основне обладнання, приладдя та інструмент для ручного дугового зварювання.
2. Як класифікують і позначають зварювальний дріт?
3. Як класифікують сталіні покриті електроди для зварювання та наплавлення? Що таке тип електрода, марка електрода?
4. Назвіть основні металургійні процеси при дуговому зварюванні?
5. Назвіть основні особливості ручного дугового зварювання. Як вибирають параметри режиму зварювання?
6. Опишіть принципову схему джерел живлення для дугового зварювання: трансформаторів, випрямлячів, генераторів.
7. Шляхи підвищення продуктивності ручного дугового зварювання.

3 ЗВАРЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ І ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

3.1 Технологія зварювання вуглецевих сталей

В залежності від хімічного складу сталь буває вуглецева і легована; вуглецева сталь поділяється на низьковуглецеву (вміст вуглецю до 0.25%), середньовуглецеву (вміст вуглецю від 0.25 до 0.6%) і високовуглецеву (вміст вуглецю від 0.6 до 2.0%). Сталь, у складі якої крім вуглецю містяться легуючі компоненти (хром, нікель, вольфрам, ванадій і т.д.), називається *легованою*. Леговані сталі бувають: низьколеговані (сумарний вміст легуючих компонентів, крім вуглецю, менш ніж 2.5%); середньолеговані (сумарний вміст легуючих компонентів, крім вуглецю, від 2.5 до 10%), високолеговані (сумарний вміст легуючих компонентів, крім вуглецю, більш ніж 10%).

За мікроструктурою розрізняють сталі перлітного, мартенситного, аустенітного, феритного й карбідного класів.

За способом виробництва сталь може бути:

а) звичайної якості (вміст вуглецю до 0.6%), яку поділяють на киплячу, напівспокійну і спокійну. Киплячу сталь одержують при неповному розкисленні металу кремнієм, вона містить до 0.05% кремнію. Спокійна сталь має однорідну будову і містить не менш 0.12% кремнію. Напівспокійна сталь займає проміжне положення між киплячою й спокійною сталями і містить 0.05 — 0.12% кремнію;

б) якісно-вуглецева чи легована, у яких вміст сірки і фосфору не повинний перевищувати по 0.04% кожного елемента;

в) високоякісна-вуглецева чи легована, у яких вміст сірки і фосфору не повинний перевищувати відповідно 0.030 і 0.035%. Така сталь також має підвищену чистоту по неметалічних включеннях і позначається буквою А, що поміщається після позначення марки.

За призначенням сталі бувають будівельні, машинобудівні (конструкційні), інструментальні і сталі з особливими фізичними властивостями.

3.1.1 Зварювання низьковуглецевих сталей

Такі сталі мають гарну зварюваність. При виборі типу й марки електрода для зварювання низьковуглецевих сталей керуються такими вимогами:

- забезпечення міцності зварного з'єднання, яке дорівнює міцності основного металу;
- одержання зварних швів без дефектів;
- забезпечення необхідного хімічного складу металу шва;

- одержання зварних з'єднань, які будуть стійкими в умовах вібраційних і ударних навантажень, а також при підвищених чи знижених температурах.

Для зварювання низьковуглецевих сталей застосовують електроди марок ОММ-5, СМ-5, ЦМ-7, КПЗ-32Р, ОМА-2, УОНИ-13/45, СМ-11 і ін. (табл. 3).

3.1.2 Зварювання середньовуглецевих сталей

Такі сталі мають підвищений вміст вуглецю, що є причиною утворення кристалізаційних тріщин при зварюванні, а також малопластичних гартівних структур і тріщин у шовній зоні. Тому для підвищення стійкості металу шва проти утворення кристалізаційних тріщин варто понизити кількість вуглецю в металі шва. Це досягається застосуванням електродів зі зниженим умістом вуглецю, а також зменшенням частки участі основного металу в металі шва.

Щоб знизити ймовірність появи гартівних структур, необхідно застосовувати попереднє й супутнє підігрівання виробу. Надійним способом досягнення міцності зварного з'єднання при низькому процентному вмісті вуглецю є додаткове легування металу шва марганцем і кремнієм.

Середньовуглецеві сталі зварюються електродами УОНИ-13/45, УП-1/45, УП-2/45, ОЗС-2, УОНИ-13/55, ДО-5А, УОНИ-13/65 і ін. (табл. 4).

Питання для самоперевірки

1. Як класифікуються сталі?
2. Які особливості зварювання низьковуглецевих сталей?
3. Як уникнути виникнення кристалізаційних тріщин при зварюванні середньовуглецевих сталей?

Таблиця 3 - Технологічні характеристики електродів для зварювання низьковуглецевих сталей

Марка електрода	Коефіцієнт наплавлення <i>% год</i>	Стійкість дуги	Витрата електрода на 1 кг наплавленого метала	Діаметр електрода ,мм	Величина струму			Рід струму	Температура прокалювання електрода
					Нижнє положення	Вертикальне положення	Стельове положення		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ОММ-5	7.2	Висока	1.8	2	60 - 70	50 - 60	60 - 70	Постінний	150
				3	100 - 130	80 - 110	90 - 120		
				4	160 - 190	130 - 150	140 - 160		
				5	200 - 220	150 - 170	—		
СМ - 5	7.2	»	1.8	4	160 - 190	130 - 160	140 - 170	»	150
				5	200 - 220	150 - 170	—		
ЦМ - 7	10.6	»	1.8	4	160 - 190	130 - 150	140 - 160	» змінний	200
				5	210 - 250	140 - 160	—		
				6	260 - 320	—	—		

Продовження таблиці 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ОМА - 2	10.0	»	1.5	2 2.5 3	25 - 45 40 - 60 50 - 80	20 - 45 35 - 60 40 - 80	20 - 45 40 - 60 50 - 80	Постійний, змінний	100
УОНИ - 13/45	8.5	Задовільна	1.6	2 3 4 5	45 - 65 80 - 100 130 - 160 170 - 200	30 - 40 60 - 80 100 - 130 140 - 160	30 - 45 70 - 90 120 - 140 150 - 170	Постійний	350 - 370
СМ - 11	9.5	Достатньо задовільна	1.45	4 5	160 - 220 200 - 250	140 - 180 160 - 200	140 - 180 —	» Змінний	300 - 350

Таблиця 4 - Технологічні характеристики електродів для зварювання середньовуглецевих сталей

Марка електрода	Коефіцієнт наплавки $\%A \cdot год$	Стійкість дуги	Витрата електродів в на 1 кг наплавленого метала	Діаметр електрода, мм	Величина струму, А			Рід струму	Температура прокалювання електрода
					Нижнє положення	Вертикальне положення	Стельове положення		
УП - 2/45	10	Достатньо задовільна	1.6	4	140 - 160	140 - 160	140 - 160	Постійний Змінний	300 - 350
				5	150 - 250	160-210	—		
ОЗС - 2	8.5	Задовільна	1.6	3	80 - 100	60 - 80	60 - 80	Постійний	250 - 300
				4	130 - 150	120 - 140	120 - 140		
				5	170 - 200	150-170	—		
УОНИ - 13/55	9.0	»	1.7	3	80 - 100	60 - 80	70 - 90	»	350
				4	130 - 160	100 - 130	120 - 140		
				5	170 - 200	140 - 160	150 - 170		
				6	210 - 240	180 - 210	—		
К - 5А	9.0	»	1.7	4	140 - 200	110 - 180	120 - 180	Постійний Змінний	350
				5	220 - 280	—	—		
				6	310 - 380	—	—		
УОНИ - 13/65	9.0	»	1.7	3	80 - 100	60 - 80	60 - 80	Постійний	400
				4	130 - 150	90 - 100	100 - 120		
				5	170 - 200	—	—		
				6	210 - 240	—	—		

3.2 Технологія зварювання легованих сталей

3.2.1 Зварювання низьколегованих і середньолегованих конструкційних сталей

Зварюваність таких сталей залежить від вмісту вуглецю і легуючих компонентів і погіршується з ростом вмісту вуглецю і легуючих компонентів. Сталі кремнієвомарганцевої групи 15ГС, 18М2С і 25М2С зварюють електродами типу Э60А марки УОНИ-13/65. Перед зварюванням кромки ретельно зачищають від бруду, іржі й окалини. Зварювання виконують гранично короткою дугою. Виріб перед зварюванням підігрівають до температури 200 °С, електроди перед зварюванням прожарюють при 400 °С протягом однієї години.

Кремнієвомарганцевомідисті сталі 10М2СД, 10ХГСНД, 15ХСНД і 12ХГ зварюють електродами типу Э50А марки УОНИ-13/55. Виріб перед зварюванням не підігрівають.

Зварювання легової машинобудівної сталі. Хромиста сталь 15Х зварюється електродами УОНИ-13/85 гранично короткою дугою без підігріву і наступної термічної обробки.

Хромомолібденова сталь 15ХМ зварюється електродами ЦЛ-14 з попереднім підігрівом виробу до 250 — 300 °С і наступним високим відпуском при 710 °С. Сталь марки 30ХМ зварюється електродами ЦЛ-30-63 з попереднім підігрівом виробу до 350 °С і наступним відпуском при 600 °С.

Хромокремнієвомарганцеві сталі 20ХГСА, 25ХГСА, 30ХГСА, 30ХГСНА зварюються електродами ЦЛ-18-63 чи НИАТ-3М гранично короткою дугою. Після зварювання з'єднання піддаються термічній обробці на високу міцність: загартування з температури 880 °С і низькому відпуску. Технологічні характеристики електродів для зварювання деяких легованих машинобудівних сталей приводяться в табл. 5.

Зварювання теплотривких сталей. До теплотривких сталей відносяться 12МХ; 20МХЛ; 34ХМ; 20Х3МВФ; 20ХМФ; 20ХМФЛ; 12Х1М1Ф; 15ХМФКР; 12Х2МФБ; Х5М; 15Х5МФА; Х5ВФ; 06Х13; 12Х17; 10Х13 і ін.

Вироби зі сталей 12МХ і 20МХЛ, що працюють при температурі до 550 °С, зварюються електродами ЦЛ-14. Зварювання виконують з попереднім підігрівом виробу до 250 — 300 °С для сталі 20МХЛ і до 200 °С для сталі 12МХ. Після зварювання рекомендується високий відпуск при температурі 710 °С. Сталь 12МХ можна зварювати також електродами ГЛ-14, якщо виріб працює при температурі до 520 °С. Підігрів і відпуск такі ж, що і при застосуванні електродів ЦЛ-14.

Вироби зі сталей 34ХМ і 20Х3МВФ, що працюють при температурі до 470 °С, зварюють електродами ЦЛ-30-63. Зварювання виконують з

попереднім і супутнім підігрівом виробу до 350 °С для сталі 34ХМ і до 400 — 450 °С — для сталі 20ХЗМВФ. Зварні з'єднання піддаються відпуску: сталь 34ХМ — при температурі 600 °С, сталь 20ХЗМВФ — при температурі 680 °С.

Вироби зі сталей 20ХМФ, 20ХМФЛ, 12Х1М1Ф, що працюють при температурі до 570 °С, зварюють електродами ЦЛ-20-63. Зварювання виконується короткою дугою з попереднім і супутнім підігрівом виробу до 300 — 350 °С. Після зварювання рекомендується високий відпуск при 700 — 740 °С протягом 3 год.

Вироби зі сталей 15ХМФКР і 12Х2МФБ, що працюють при температурі до 600 °С, зварюють електродами ЦЛ-26М-63. Зварювання виконують короткою дугою з попереднім і супутнім підігрівом до температури 350—400 °С, а після зварювання виконують високий відпустк при температурі 740 — 760 °С.

Вироби зі сталей Х5М и 15Х5МФА, що працюють в агресивних середовищах при температурі до 450 °С, зварюють електродами ЦЛ-17-63 з попереднім і супутнім підігрівом до 300 — 450 °С і з наступним високим відпуском після зварювання при температурі 760 °С протягом 3 год. Вироби зі сталей Х5ВФ, 08Х13 і 12Х17 зварюють електродами СЛ-16.

Технологічні дані електродів для зварювання теплотривких сталей наведені в табл. 6.

Зварювання високолегованих корозійностійких, жаростійких і жароміцних сталей і сплавів. До зварних з'єднань високолегованих сталей і сплавів крім вимог до межі міцності, а також пластичності пред'являються й інші вимоги, що визначаються призначенням конструкції та властивостями металу, що зварюється. Ці вимоги такі:

- для корозійностійких (нержавіючих) сталей — можливість протистояти міжкристалітній, загальній рідинній, ножовій корозії під напругою;
- для окалиностійких сталей і сплавів здатність протистояти окалиновинекненню і міжкристалітній газовій корозії;
- для жароміцних сталей і сплавів забезпечення тривалої міцності, опірності повзучості, стабільності мікроструктури, стійкості проти крихкості при тривалому впливі високих температур і навантажень і малої чутливості до надрізу й окалиностійкості.

Основними труднощами при зварюванні високолегованих сталей і сплавів є: забезпечення стійкості зварених з'єднань проти утворення кристалізаційних тріщин, корозійної стійкості, а також збереження властивостей з'єднань під дією робочих температур і напруг.

Таблиця 5 - Технологічні характеристики електродів для зварювання легованих сталей

Марка електрода	Коефіцієнт наплавлення, г/А·год	Стійкість дуги	Витрата електродів на 1кг наплавленого металу	Діаметр електрода, мм	Величина струму, А			Рід струму	Температура прокалювання електродів, °С
					Нижнє положення	Вертикальне положення	Стельове положення		
УОНИ - 13/85	9.5	Задовільна	1.5	3	80—100	70 - 80	70 - 90	Постійний	370
				4	130 - 160	90 - 120	100 - 140		
ЦЛ - 14	10.5	Висока	1.6	4	160 - 180	120 - 160	120 - 160	Постійний, змінний	200
				5	200 - 2	—	—		
ЦЛ - 30-63	10.4	Задовільна	1.6	4	140 - 160	120 - 140	»	350	
				5	180 - 210	—			—
ЦЛ - 18-63	8.5	»	1.8	4	130 - 160	120 - 140	120 - 130	Постійний	350
				5	180 - 210	—			
НИАТ - 3М	10	»	1.6	2.5	60 - 100	—	—	»	300 - 450
				3	90 - 130				
				4	150 - 180				

Таблиця 6 - Технологічні характеристики електродів для зварювання теплостійких сталей

Марка електрода	Коефіцієнт наплавлення, г/А·год	Стійкість дуги	Витрата електродов на 1 кг наплавленого металу	Діаметр електрода, мм	Величина струму, А			Рід струму	Температура прокалювання, °С
					Нижнє положення	Вертикальне положення	Стельове положення		
ГЛ-14	8	Задовільна	1.5	3	100 - 120	80 - 110	80 - 110	Постійний	300 - 350
				4	160 - 180	130 - 160	130 - 160		
				5	200 - 220	—	—		
ЦЛ.20.63	10.3	»	1.6	4	140 - 160	110 - 130	—	»	330 - 350
				5	180 - 210	—	—		
ЦЛ-26М-63	10.5	Висока	1.6	3	110 - 130	100 - 120	100 - 120	»	330 - 350
				4	160 - 180	140 - 160	140 - 160		
ЦЛ-17-63	10.5	Задовільна	1.6	3	80 - 120	70 - 90	70 - 100	»	300 - 350
				4	130 - 160	130 - 150	130 - 150		

Таблиця 7 - Технологічні характеристики електродів для зварювання корозійностійких сталей

Марка електрода	Коефіцієнт наплавлення <i>г/А год</i>	Стійкість дуги	Витрати електродів на 1 кг наплавленого металу	Діаметр електрода, <i>мм</i>	Величина струму, <i>А</i>			Рід струму	Температура прокалювання, °С
					Нижнє положення	Вертикальнепо- ложення	Стельове положення		
ОЗЛ-14	11	Добра	1.6	3	50 - 70	40 - 60	40 - 60	Постійний, змінний	200 - 250
				4	120 - 140	80 - 120	90 - 120		
ОЗЛ-8	13	Задовільна	1.6	3	60 - 80	50 - 70	50 - 70	Постійний	270
				4	110 - 130	70 - 110	70 - 110		
ЦЛ-11	12.5	»	1.8	3	70 - 90	60 - 80	60 - 80	»	320 - 350
				4	110 - 130	80 - 110	80 - 110		
ЦТ-15-1	12	»	1.6	3	80 - 110	70 - 0	70 - 90	»	350 - 450
				4	120 - 140	90 - 110	90 - 110		
ЗІО-3	12.5	»	1.55	3	80 - 100	70 - 90	70 - 90	»	300 - 320
				4	110 - 130	100 - 120	100 - 120		

Зварювання корозійностійких сталей. До корозійно-стійких сталей відносяться 08X18H10T, 12X18H9, 12X18H9T, 08X18H12Б, 12X21H5T, 09X16H13Б, 12X18H12T та ін.

Сталі 08X18H10T, 08X18H10 і 12X18H10T зварюють електродами ОЗЛ-14, якщо до металу шва пред'являються вимоги стійкості проти міжкристалітної корозії. Зварювання цими електродами забезпечує у зварному шві вміст феритної фази 6 — 10%.

Сталі 12X18H9, 12X18H9T зварюють електродами ОЗЛ-8, якщо до металу шва не пред'являються вимоги стійкості проти міжкристалітної корозії, чи якщо зварне з'єднання буде експлуатуватися при температурі до 350 °С (при відсутності агресивних середовищ — при температурі від 253 до 800° С). Вміст фериту в зварних швах коливається від 3.5 до 8.5%.

Сталі 12X18H10T, 12X18H9T, 08X18H12T, 08X18H12Б, 12X21H5T, 09X16H13Б зварюються електродами ЦЛ-11, якщо до зварного шва пред'являються жорсткі вимоги стійкості проти міжкристалітної корозії. Вміст феритної фази в зварних швах забезпечується від 2.5 до 7%.

Сталь 12X18H12T зварюють електродами ЦТ-15-1 (кореневий шов), зварне з'єднання може експлуатуватися при температурі 600 — 650 °С і високому тиску. Вміст феритної фази в зварених швах коливається від 5.5 до 9%.

Сталі 12X18H10T, 12X18H9T зварюють електродами ЗІО-3, якщо зварні шви будуть експлуатуватися при температурі до 560° С чи якщо до металу шва будуть пред'явлені вимоги стійкості проти міжкристалітної корозії. Вміст феритної фази в звареному шві регламентується від 2.5 до 5%.

Технологічні властивості електродів для зварювання корозійностійких сталей приведені в табл. 7.

Зварювання жаростійких сталей. До цієї групи сталей відносять 15X25T, 15X28, 20X23H18, 20X23H13, 20X20H14C2, 20X25H20C2 і ін.

Сталі 15X25T и 15X28 зварюють електродами ОЗЛ-6, якщо зварені вироби будуть експлуатуватися при температурі 1150°С (без циклічних різких змін і в середовищах, що не містять сірчистий газ). Зварювання виконують короткою дугою. Кромки підготовляють під зварювання тільки механічним способом. Зміст феритної фази регламентується від 2.5 до 10%.

Сталі 20X23H18, 20X25T і 20X28 зварюють електродами ЦЛ-25, якщо зварні вироби будуть експлуатуватися при температурі вище 850°С. Зварювання виконують валиками, що мають ширину не більш трьох діаметрів електрода. Кратери заплавляють частими короткими замиканнями, вміст феритної фази регламентується від 3 до 9 %.

Сталі 15X25T, 15X28, 20X23H13, 20X23H18, що знаходяться в експлуатації при температурі 900 — 1100 °С, зварюють електродами ОЗЛ-4. Зварювання виконують гранично короткою дугою. Кромки обробляють під зварювання тільки механічним способом. Вміст феритної

фази регламентується від 2.5 до 8%.

Сталі 20X23H18, 20X23H13, що знаходяться в експлуатації в окисних і науглецьованих середовищах при температурі 900 — 1050° С, спаровують електродами ОЗЛ-9А. При зварюванні цих сталей особливо необхідно стежити за неприпустимістю появи тріщин у кратерах. Феритна фаза відсутня і ГОСТом не нормується. Зварені шви недостатньо стійкі проти міжкристалітної корозії.

Сталі 20X20H14C2, 20X25H20C2, що працюють при температурі до 1050°С, зварюють електродами ГС-1 (перший шар). Жаростійкість наплавленого металу до 1150°С.

Сталі 20X20H14C2, 20X25H20C2, що працюють при температурі 900 — 1100° С, зварюють електродами ОЗЛ-5. Кромки підготовляють під зварювання тільки механічним способом. Зварені шви стійкі проти виникнення гарячих тріщин. Сталь 20X20H14C2, що знаходиться в експлуатації при температурі 900 — 1100°С, можна також зварювати електродами ЦТ-17 при накладенні швів невеликої ширини — не більше 3 діаметрів електрода.

Технологічні характеристики електродів для зварювання жаростійких сталей наведені у табл. 8.

Зварювання жароміцних сталей і сплавів. До сталей цієї групи відносяться 08X16H14B2БР, 08X16H16B2МБР, 09X14H14B2М, 45X14H14B2М, 08X16H13M2Б, 09X14H14B2М, 12X18H12Т, 20X23H13, 20X23H18, ХН35ВТ і ін.

Сталі 08X16H14B2БР і 08X16H16B2МБР зварюють електродами ЦТ-16-1. Кратери заварюють короткими замиканнями електродів. Ці ж сталі зварюють електродами ЦТ-16, якщо вироби експлуатуються при температурі до 700 °С.

Сталі 09X14H14B2М і 45X14H14B2М, що працюють при температурі до 600°С, зварюють електродами ЦТ-1. Зварні шви стійкі проти утворення гарячих тріщин.

Сталі 08X16H13M2Б, 09X14H14B2М і 12X18H12Т, що працюють при температурі до 620 °С, зварюють електродами ЦТ-7. Утворенню гарячих тріщин у зварних швах запобігають збільшенням кількості феритної фази від 2 до 5%. Після зварювання застосовують відпал зварного з'єднання при 750 — 800 °С протягом 10 год.

Сталі 20X23H13, 20X23H18, що працюють при температурі до 1050 °С, зварюють електродами ОЗЛ-9. Вогнева підготовка кромки під зварювання не допускається. При багатошаровому зварюванні шви необхідно виконувати електродами ОЗЛ-9 через шар, наплавлений електродами ОЗЛ-4, ОЗЛ-5; ОЗЛ-6 і ГС-1.

Сплави на залізо-нікелевій основі ХН35ВТ зварюються електродами КТИ-7-62.

Технологічні характеристики електродів для зварювання жароміцних сталей і сплавів приведені в табл. 9.

Таблиця 8 - Технологічні характеристики електродів для зварювання жароміцних сталей

Марка електрода	Коефіцієнт наплавлення, г/А год	Стійкість дуги	Витрата електродів на 1 кг наплавленого металу	Діаметр електрода, мм	Величина струму, А			Рід струму	Температура прокалювання, °С
					Нижнє положення	Вертикальне положення	Стельове положення		
ОЗЛ-6	11.5	Задовільна	1.6	2	30 - 50	25 - 40	25 - 40	Постійний	300
				2.5	40 - 70	35 - 60	35 - 60		
				3	60 - 80	55 - 75	55 - 75		
				4	120 - 140	90 - 120	90 - 120		
ЦЛ.25	10.5	»	1.8	3	80 - 100	70 - 90	70 - 90	»	350 - 400
				4	110 - 140	90 - 120	90 - 120		
ОЗЛ-4	12	»	1.43	2	30 - 50	25 - 40	25 - 40	»	300
				2.5	40 - 70	35 - 60	35 - 60		
				3	60 - 80	55 - 75	55 - 75		
				4	110 - 130	90 - 120	90 - 120		
ОЗЛ-9А	13.5	Добра	1.5	3	70 - 90	50 - 80	50 - 80	»	300
				4	110 - 130	90 - 110	90 - 110		
ОЗЛ-5	12.5	Задовільна	1.46	3	60 - 80	55 - 75	55 - 75	»	300
				4	110 - 130	90 - 120	90 - 120		
				5	140 - 160				
ЦТ-17	10.5	»	1.9	3	60 - 80	70 - 90	70 - 90	»	350 - 400
				4	110 - 130	100 - 125	95 - 115		

Таблиця 9 - Технологічні характеристики електродів для зварювання жароміцних сталей и сплавів

Марка електрода	Коефіцієнт наплавлення. <i>г/А. год</i>	Стійкість дуги	Витрата електродів в на 1 кг наплавленого металу	Діаметр електрода, мм	Величина струму, А			Рід струму	Температура прокалювання, ° С
					Нижнє положення	Вертикальне положення	Стельове положення		
ЦТ-16-1	11	Задовільна	1.49	3 4	80 - 100 110 - 140	70 - 90 90 - 125	70 - 90 90 - 125	Постійний	350 - 450
ЦТ-16	10.5	»	1.49	3 4	80 - 100 110 - 140	— —	— —	»	350 - 450
ЦТ-1	13	»	1.59	3 4	80 - 110 130 - 150	70 - 100 115 - 135	70 - 100 105 - 125	»	350 - 450
ЦТ-7	12	»	1.86	3 4	80 - 110 100 - 140	— —	— —	»	350 - 400
КТИ-7-62	11.2	»	1.6	2.5	65 - 75	—	—	»	300 - 350
				3	80 - 100	—	—		
				4	110 - 130	—	—		

Питання для самоперевірки

1. Які особливості зварювання низьколегованих конструкційних сталей?
2. Чому леговані сталі необхідно зварювати короткою дугою?
3. У чому полягає особливість зварювання теплотривких сталей?

4 ЗВАРЮВАННЯ ЧАВУНУ, КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ, НАПЛАВЛЕННЯ ТВЕРДИХ СПЛАВІВ

4.1 Зварювання чавуну

Чавунами називають залізовуглецеві сплави, що містять вуглецю понад 2.0%. Розповсюджені марки чавунів звичайно, містять 2.5 — 4% вуглецю, 1 — 4.5% кремнію, 0.2 — 1.5% марганцю, домішки фосфору й сірки.

Вуглець у чавуні знаходиться або в хімічно зв'язаному стані (карбіди заліза у виді ледебуриту, первинного й вторинного цементиту), або у вільному стані, тобто у виді графіту. Тому структура чавуну залежить від кількості вуглецю, що знаходиться в хімічно зв'язаному стані, і може бути: перліто-графітна; ферито-перліто-графітна; ферито-графітна. Чавуни розрізняють за структурою, способом виготовлення, хімічним складом й призначенням.

У залежності від того, в якому стані знаходиться вуглець чавуни поділяють на білі та графітізовані. В білих чавунах весь вуглець, не розчинений у залізі, знаходиться у зв'язаному стані у вигляді хімічної сполуки Fe_3C - карбіду заліза (*цементиту*). Процес утворення в чавуні цементиту називається відбілом.

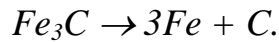
У промисловості застосовуються чавуни, в яких весь вуглець (або його більша частина) знаходиться у вигляді графіту, що забезпечує зниження твердості, підвищення оброблюваності різанням, високі ливарні і антифрикційні властивості. Такий чавун називається *графітізованим*. Утворення графіту в чавуні може відбуватися в результаті безпосереднього виділення його в рідкому чавуні або внаслідок розпаду попередньо утвореного цементиту. Процес утворення в чавуні (а інколи і в сталі) графіту називається графітизацією.

На процес кристалізації чавуну в білому чи графітізованому стані впливають швидкість охолодження виливків після заливання рідким металом та хімічний склад чавуну. Так, відбілу сприяють висока швидкість охолодження і такі елементи як марганець, хром, сірка. Графітизації ж сприяють повільне охолодження, а з хімічних елементів - вуглець і кремній.

Вплив швидкості охолодження на процес графітизації виявляється в тому, що в одному і тому ж виливку, частини якого охолоджуються з різною швидкістю, може бути як біла структура (поверхневі шари, тонкі частини виливка), так і графітізована (товсті частини виливка, внутрішні стінки). Чавун, в якому частина вуглецю знаходиться у вигляді цементиту Fe_3C , а частина - у вигляді графіту, називається *половинчастим*.

Якщо чавун, в якому вуглець знаходиться у вигляді цементиту (білий або половинчастий) зазнає тривалого впливу високої температури, то в

ньому також відбудеться процес графітизації, тобто розпад цементиту на вуглець і залізо:



Така термічна обробка білого або половинчатого чавуну називається **відпалом**.

В залежності від форми графітних включень у графітизованих чавунах останні поділяються на *сірий*, *ковкий*, *високоміцний* та чавун із *вермикулярним* графітом.

Структура чавуну складається з металевої основи та графіту. Графітні включення в металевій основі з огляду на те, що графіт має дуже низькі механічні властивості порівняно з металевою основою, можна розглядати як порожнечі, тріщини. Природно, що чим більший об'єм займають ці порожнечі, тобто чим більше в чавуні вуглецю, тим нижчі механічні властивості чавуну. При однаковому об'ємі порожнечі властивості чавуну будуть залежати також від площі їхньої поверхні, тобто від форми. Включення пластинчастої форми мають найбільш розгалужену поверхню і тому найбільше знижують механічні властивості. З округленням графітних включень їхній негативний вплив зменшується й стає найменшим у випадку включень кулястої форми.

Сірий чавун (ГОСТ1412-79). Сірим називається чавун, в якому графіт має форму дещо вигнутих пластин різної довжини та товщини в залежності від марки чавуну.

Ковкий чавун (ГОСТ 1215-79). Ковким називається чавун, в якому графіт має пластівчасту (кляксоподібну) форму. Така форма графіту утворюється при відпалі білого чавуну. Назва “ковкий” не означає, що цей чавун можна кувати, або піддавати будь-якій іншій обробці тиском. Це суто ливарний матеріал а назва свідчить тільки про його більшу пластичність порівняно із сірим чавуном.

Високоміцний чавун (ДСТУ 3925-99). Високоміцним називається чавун, в якому графітні включення мають кулясту форму. Така форма графіту утворюється при обробці рідкого чавуну невеликими дозами таких елементів як магній, церій, кальцій, ітрій. Ці елементи називаються *модифікаторами*. Вони, практично, не змінюють хімічний склад сплавів, зате суттєво впливають на їхню структуру, змінюючи форму графітних включень, розмір зерен, їх розташування тощо. Як модифікатор для виготовлення чавуну з кулястим графітом найчастіше всього використовується магній - найбільш ефективний і дешевий елемент. Остаточний вміст магнію для отримання кулястого графіту становить 0.04...0.06%. За вмістом решти елементів високоміцний чавун майже не відрізняється від сірого.

Чавун із вермикулярним графітом (ДСТУ 3326-99). Високоміцний чавун із кулястим графітом поряд із його позитивними якостями (високі механічні та експлуатаційні характеристики) має і суттєві недоліки

(підвищену об'ємну усадку, понижену теплопровідність, схильність до відбілу). В чавуні з вермикулярним графітом ці недоліки відсутні. В ньому поєднуються високі механічні і ливарні властивості, висока теплопровідність, низька собівартість.

Графіт в такому чавуні має вигляд коротких потовщених пластин з закругленими кінцями, форма яких є перехідною між пластинчастим і кулястим графітом.

Структура чавуна залежить від швидкості охолодження і від вмісту в ньому легуючих домішок. На рис. 33, а представлена схема впливу елементів на відбілюваність чавуну. При низькому вмісті вуглецю й кремнію виходить білий чавун.

На рис. 33, б показана залежність структури чавуну від змісту вуглецю й кремнію, а на рис. 33, в — залежність структури від швидкості охолодження.

Підвищення вмісту вуглецю в залізовуглецевому сплаві, викликає зниження температури плавлення й підвищення його рідкоплинності, що є однією з причин неможливості зварювання чавуну у всіх просторових положеннях. Вуглець у чавуні сприяє виділенню структурно-вільного графіту, що знижує механічні властивості чавуну.

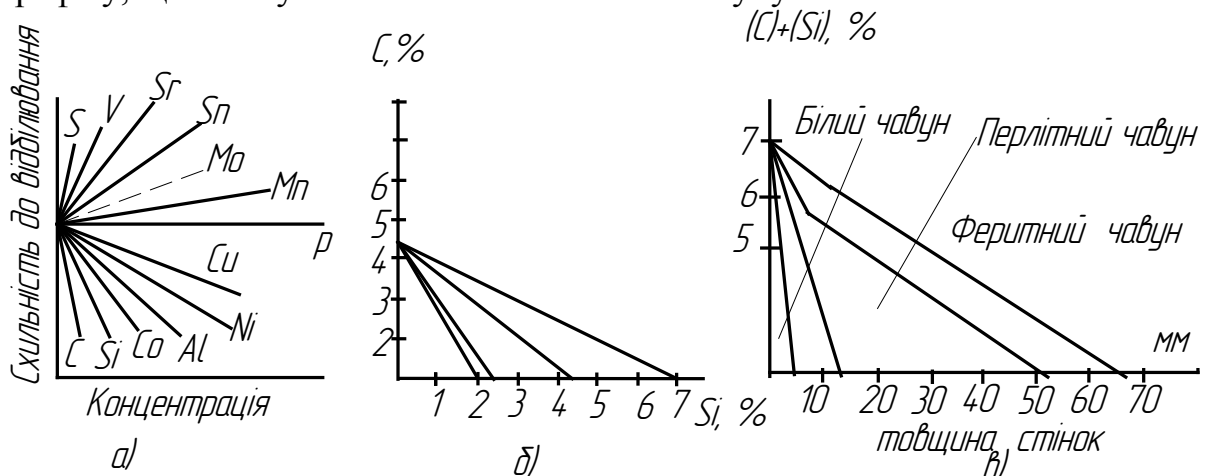


Рисунок 33 – Залежність структури чавуну від:

- а) концентрації компонентів; б) вмісту вуглецю та кремнію;
- в) від товщини стінок (швидкості охолодження) та сумарного вмісту в ньому вуглецю й кремнію

Кремній у чистому залізі розчиняється до 14.3%. Він зменшує стійкість карбідів і сприяє виділенню вільного графіту. Збільшення вмісту кремнію в чавуні зменшує усадку чавуна при затвердінні за рахунок збільшення кількості графіту, що виділяється. Чим вищий вміст кремнію, тим вище графітоутворення, тобто кремній сприяє графітизації чавуну.

Марганець, молібден, хром, сірка, ванадій перешкоджають утворенню графіту.

Марганець із залізом утворює розчини будь-якої концентрації і має велику спорідненість із сіркою, вуглецем й киснем і знаходиться у вигляді сульфїду марганцю (MnS) і залізомарганцевого карбїду $[(Fe \cdot Mn)_3C]$.

Сірчистий марганець погано розчиняється в рідкому й твердому чавуні. Марганець є стабілізатором карбїду. При збільшенні вмісту марганцю збільшується усадка чавуну й метал набуває схильність до утворення гарячих тріщин.

Сірка із залізом утворює сульфїд заліза (FeS), що являє собою тверду, крихку складову. Сульфїд заліза із залізом утворює евтектику з температурою плавлення $953\text{ }^\circ\text{C}$. Евтектика, кристалїзується по границях зерен трохи пізніше основного металу (чавуну), і сприяє утворенню гарячих тріщин.

Фосфор у залізі розчиняється до 0.3%, але утворює потрійну евтектику заліза, цементиту і фосфористого заліза, що являє крихку складову з температурою плавлення $950\text{ — }980\text{ }^\circ\text{C}$. Евтектика збільшує рідкоплинність (рідкотекучість) чавуну. Фосфор не відбілює і не графітизує чавун. Збільшення фосфору в чавуні збільшує його рідкоплинність.

Магній, який є стабілізатором карбїдів (сприяє відбілюванню чавуну), при додаванні в рідкий чавун, сприяє виділенню графїту кулястої форми.

У чавуні можуть утворюватися такі структурні складові:

- ферит — твердий розчин вуглецю в залізі;
- цементит — хїмічна сполука заліза з вуглецем;
- перліт — суміш фериту з цементитом;
- ледебурит — евтектична суміш цементиту й перліту;
- графїт — особлива форма вуглецю, найбільш м'яка і разом з тим крихка складова чавуну.

4.1.1 Способи зварювання

Зварювання чавуну застосовується в ремонтних цілях і для виготовлення зварно-литих конструкцій. До зварних з'єднань чавунних деталей у залежності від типу й умов експлуатації висувають вимоги до механїчної мїцності, щільності (водонепроникності, газонепроникності) і оброблюваності рїзальним інструментом. Забезпечити ці вимоги при зварюванні дуже складно через фізико-хїмічні особливості чавуну.

Труднощі, що виникають при зварюванні чавуну, обумовлені, як правило, низькою стїйкістю металу зварного з'єднання проти утворення тріщин і поганою його оброблюваністю.

Низька стїйкість основного металу й металу біля шовної зони проти утворення тріщин характерна для чавуну зниженим запасом деформаційної здатності (зниження мїцності й пластичності).

Зазначені особливості чавуна є наслідком порушення суцільності його металевої основи включеннями графїту, а також схильністю його до

відбілювання та загартування навіть при невеликих швидкостях охолодження. Ці властивості чавуну визначаються високим вмістом вуглецю в ньому.

З'єднання чавунних деталей між собою виконують паянням та зварюванням (термітним, ливарним, дуговим, електрошлаковим). Зварювання ведуть без підігріву (холодний спосіб зварювання), з місцевим підігрівом і з загальним підігрівом усього виробу. Для дугового зварювання використовують вугільні, графітові, сталеві й леговані електроди, а також електроди з кольорових металів. Підготовку місць під зварювання виконують механічним шляхом чи вогневим способом. Для утримання розплавленого металу зварювальної ванни (чавун має високу рідкоплинність) застосовують спеціальні формовки. Призначення формовки — утримувати розплавлений метал. Формувальна маса має наступний склад: кварцовий пісок, змішаний на рідкому склі 40%, формувальна земля 30% і біла глина 30%.

Підготовлена до зварювання деталь піддається загальному чи місцевому підігріву до температури 350 — 450 °С. Іноді для особливо складних деталей підігрів роблять до температури 550 — 600 °С.

Зварювання виконують як на змінному, так і на постійному струмі. Величину струму підбирають із розрахунку 50—90 А на 1 мм діаметра електрода.

4.1.2 Техніка й технологія зварювання

Дугове зварювання вугільним електродом. При дуговому зварюванні вугільним електродом застосовують у якості електродів вугільні чи графітові стрижні. Присадковим матеріалом служать прутки чавуну, а для захисту й розкислення ванни застосовують флюс, що складається з технічної безводної бури ($Na_2B_4O_7$), прожареної при температурі близько 400° і розтертий у порошок. Іноді як флюс застосовують суміш, що складається з 23% технічної бури, 27% соди (Ca_2CO_3) і 50% азотнокислого натрію ($NaNO_3$).

Дугове зварювання чавунним електродом. Як електроди застосовують литі стрижні діаметром 8 — 12 мм. На стрижні наносять спеціальні графітозувальне покриття. Зварювання роблять на постійному струмі при зворотній полярності як у гарячому, так і в холодному стані. До складу покриття входить графіт, феросиліцій, терміт, мармур, алюміній (порошок), титанова руда і рідке скло.

Наплавлення й зварювання за способом Ростовського інституту інженерів транспорту. За цим способом наплавлення роблять чавунним електродом діаметром 7 — 8 мм по шару гранульованої шихти.

Застосування великого струму, графітизаторів і захисного шару шихти приводить до того, що наплавлений метал виходить м'яким і обробляється звичайним різальним інструментом. Відсутність загартування в металі шва й у перехідних зонах основного металу

пояснюється значним розігрівом основного металу й уповільненим охолодженням. Цей спосіб займає проміжне положення між гарячим і холодним способами зварювання чавуну. Шихта складається з чавунної стружки 30%, феросиліцію 20%, алюмінію 30% і силікокальцію 12%. Основою служить рідке скло.

Холодне зварювання чавуну. Холодне зварювання чавуну — це такий спосіб зварювання, коли місцевий чи загальний підігрів виробу відсутній. Холодне зварювання чавуну роблять сталевими електродами, електродами з кольорових металів і електродами з аустенітного чавуну.

Зварювання сталевими електродами. При зварюванні сталевими електродами з метою утворення міцного наплавленого металу в чавунний виріб загортають шпильки, які згодом обварюють. Такий спосіб застосовують при ремонті важких і громіздких чавунних деталей. При зварюванні чавуну сталевими електродами метал шва, звичайно, містить підвищену кількість вуглецю, внаслідок чого він має високу твердість і схильний до утворення кристалізаційних і холодних тріщин.

Для зниження твердості металу шва при зварюванні сталевими електродами застосовують два способи.

Першим способом знижують у металі шва вміст вуглецю шляхом зменшення глибини проплавлення основного металу. Зварювання ведуть по шару окисного флюсу, що містить до 30 % окалини, де флюс виконує функцію окислювача вуглецю.

Другим способом одержують хімічний склад і структуру металу шва, близький за хімічним складом й структурою сірого чавуна. Це досягається шляхом нанесення на стержень із вуглецевої сталі товстого графітизувального покриття, що містить 30% феросиліцію і 30% графіту.

Зварювання міднозалізними електродами. Для зварювання чавуну застосовують також і міднозалізні електроди. Покриття цих електродів складається з основного типу, що містить залізний порошок. Як стрижні застосовують мідь марки М2, М3 чи її сплави.

Найбільш розповсюдженими типами електродів є електроди марки ОЗЧ-1 і МНЧ-1. Наплавлений метал цих електродів добре обробляється. Зварне з'єднання чавуну, виконане цими електродами, являє собою механічну суміш міді і залізовуглецевого сплаву, з'єданого з основним металом загальними кристалами сталі, а також шляхом часткової дифузії міді в мікропори чавуну.

Зварювання залізонікелевими електродами. Електроди марки ЦЧ-3 і ЦН-3А виготовляють з залізонікелевого дроту з покриттям фтористо-карбонатного типу і застосовують для зварювання високоміцних і сірих чавунів.

Дугове зварювання електродами з аустенітного чавуну з струмопровідним покриттям. Ці електроди призначені для заварювання дефектів лиття і ремонтного зварювання. Зварювання цими електродами ведуть постійним струмом при прямій полярності. Покриття цих

електродів має гарну електропровідність, і тому дуга горить попеременно між металевим стрижнем і виробом, а також між покриттям і виробом.

Механізовані способи зварювання чавуну. Чавун іноді зварюють напівавтоматичним і електрошлаковим зварюванням.

Напівавтоматичне зварювання виконується із застосуванням порошкового дроту і дають досить гарні результати. Електрошлакове зварювання також забезпечує задовільні властивості зварного з'єднання із сірого чавуну. При цьому способі зварювання застосовують як електроди литі чавунні пластини. Правильний підбір електродів при електрошлаковому зварюванні і застосування фторидних знесірчених і неокислювальних флюсів, а також уповільнене охолодження шва й навколошовної зони, що характерно тільки для електрошлакового зварювання, дозволяють одержати зварні шви без вибілених ділянок, тріщин, пор і інших дефектів, що впливають на якість звареного з'єднання.

Питання для самоперевірки

1. Як впливають вуглець і кремній на структуру та властивості чавуну?
2. Які способи зварювання чавуну існують?
3. Які електроди застосовують для дугового зварювання чавуну?

4.2 Зварювання кольорових металів

4.2.1 Мідь і її сплави

Загальні відомості. Мідь має високу електропровідність, теплоємність, теплопровідність і корозійну стійкість, а також має досить високу пластичність. У відпаленому стані вона не чутлива до низьких температур і зберігає при них високі пластичні властивості. Завдяки перерахованим властивостям мідь і її сплави широко застосовуються в різних областях народного господарства.

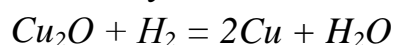
Основні характеристики міді такі: температура плавлення $1083\text{ }^{\circ}\text{C}$, тимчасовим опором ненагартованої міді — 20 кГ/мм^2 , відносне видовження — 50% , густина — 8.96 г/см^3 .

Зварюваність міді значною мірою залежить від її чистоти: чим менше міститься в міді шкідливих домішок, тим вище її зварюваність. Кращу зварюваність має розкислена мідь, що містить не більше 0.01% кисню. Шкідливими домішками в міді, які знижують механічні властивості й погіршують її зварюваність, є також сірка, свинець і вісмут.

Розплавлена мідь інтенсивно розчиняє в собі гази, особливо кисень. При наявності в основному чи присадковому металі кисню він утворює з міддю закис міді Cu_2O . Закис міді утворює з міддю (основним металом) евтектичний сплав, що плавиться при температурі $1068\text{ }^{\circ}\text{C}$, тобто при

більш низькій температурі, ніж чиста мідь. При кристалізації металу шва евтектика розташовується по границях зерен, а оскільки вона є **інтерметалідом**, то металевий зв'язок між зернами міді порушується — зварне з'єднання стає крихким. Тому зварювати мідь необхідно присадним матеріалом чи електродами, що забезпечують гарне розкислення металу зварного шва. Для цього до складу присадкового дроту чи до складу покриття електродів вводять розкислювачі: фосфор, кремній, марганець, алюміній і ін.

Водень, що знаходиться в розплавленому металі, також чинить негативну дію на зварне з'єднання. При кристалізації металу шва водень з'єднується з киснем закису міді, утворити при цьому водяні пари, що є причиною водневої хвороби. У момент кристалізації зварного шва водяна пара прагне вийти на поверхню, утворити при цьому велику кількість порожнин і тріщин. Цей процес відбувається за такою реакцією:



Ручне зварювання вугільним електродом. Зварювання міді вугільним чи графітовим електродом виконують постійним струмом прямої полярності. Довжина дуги повинна бути 35 — 40 мм. Присадковим матеріалом служать круглі чи прямокутні прутки з міді марки М1 і М2, а також мідні прутки з присадкою фосфору, що є активним розкислювачем. Щоб уникнути перегріву й інтенсивного окислювання металу присадкового прутка при розплавленні, перетин останнього повинний бути 20 — 25 мм².

Флюсом при зварюванні служать плавлена бура чи суміш з 95% прожареної бури і 5% металевого порошкоподібного магнею. Перед зварюванням порошкоподібні флюси наносять на змочену рідким склом поверхню присадного прутка чи зварювальні кромки, які потім просушують на повітрі.

Таблиця 10 - *Режими ручного дугового зварювання міді вугільним і графітовим електродами*

Товщина металу, мм	Діаметр електродів, мм		Діаметр присадних прутків, мм	Величина струму, А
	вугільних	графітових		
2—5	15	13	2 — 3	200 — 300
5—10	18	15	5 — 7	300 — 450
10—15	25	20	7 — 8	450 — 600

Присадковий пруток і кромки металу, що зварюється, перед нанесенням флюсу зачищають металевою щіткою чи промивають 10%-вим розчином каустичної соди.

Метал товщиною більше 4 мм повинний мати оброблення кромки з кутом розкриття 70 — 90°. Зварювання стиків ведуть на графітовій чи азбестовій підкладці. Після зварювання шов проковують і швидко прохолоджують.

Режими ручного дугового зварювання вугільним і графітовим електродами приведені в табл. 10.

Ручне зварювання металевим електродом. Металевим електродом зварюють виріб із міді, у вигляді прокату товщиною більше 2 мм.

Зварювання виконують постійним струмом зворотної полярності при загальному підігріві виробів до 300 — 400° С. Стикові з'єднання при товщині металу до 4 мм зварюють без оброблення кромки. При товщині металу від 5 до 12 мм застосовують V-подібне оброблення кромки з кутом розкриття шва 60 — 70°.

Електроди «Комсомолец-100» застосовують для зварювання міді, що містить не більш 0,01% кисню, і для зварювання міді зі сталлю. Зварювання виконують короткою дугою постійним струмом зворотної полярності. Електроди МН-5 застосовують для зварювання трубопроводів з мідно-нікелевого сплаву МНЖ5-1 між собою, з латунню Л90 і бронзою марки Бр. АМц9-2 з товщиною стінок до 5 мм. Зварювання виконують короткою дугою постійним струмом зворотної полярності.

Електроди $\frac{\text{АНМц}}{\text{ЛКЗ - АБ}}$ призначені для заварювання дефектів у

вливках з алюмінієвих і алюмінієво-нікелевих бронз. Зварювання виконують короткою дугою постійним струмом зворотної полярності.

Ручне аргонодугове зварювання. При ручному зварюванні міді в захисних газах застосовують інертні гази гелій і аргон. Зварювання виконують вольфрамовим електродом постійним струмом прямої полярності при загальному підігріві виробу до температури 350 — 400 °С. Присадковим матеріалом служить дріт із бронзи Бр. КМц3-1 і ін.

Зварювання ведуть лівим чи правим способами. Перед початком зварювання дугу збуджують на графітовій чи вугільній пластині, а потім переносять на виріб. Запалювати дугу безпосередньо на виробі не рекомендується, тому що при цьому відбувається оплавлення й забруднення вольфрамового електрода. Зварювання можна виконувати в нижньому, вертикальному і стельовому положеннях.

У середовищі аргону мідь можна зварювати і змінним струмом, при цьому швидкість зварювання значно нижче, а зовнішній вигляд шва кращий, ніж при зварюванні постійним струмом. При зварюванні змінним струмом дротом Бр. КМц-1 бура для розкислення не потрібна, тому що розплавлений метал не має поверхневої плівки: вона видаляється внаслідок катодного розпилення. Катодне розпилення ґрунтоване на русі позитивних

іонів з великою швидкістю до катода та його бомбардуванні. Процес зварювання відбувається стійко, і зварювання можливе у всіх просторових положеннях.

На рис. 34 показані зразки зварених патрубків діаметром до 80 мм із міді МЗС, виконаних аргонодуговим зварюванням із застосуванням дроту Бр. КМц-3-1 і бури.

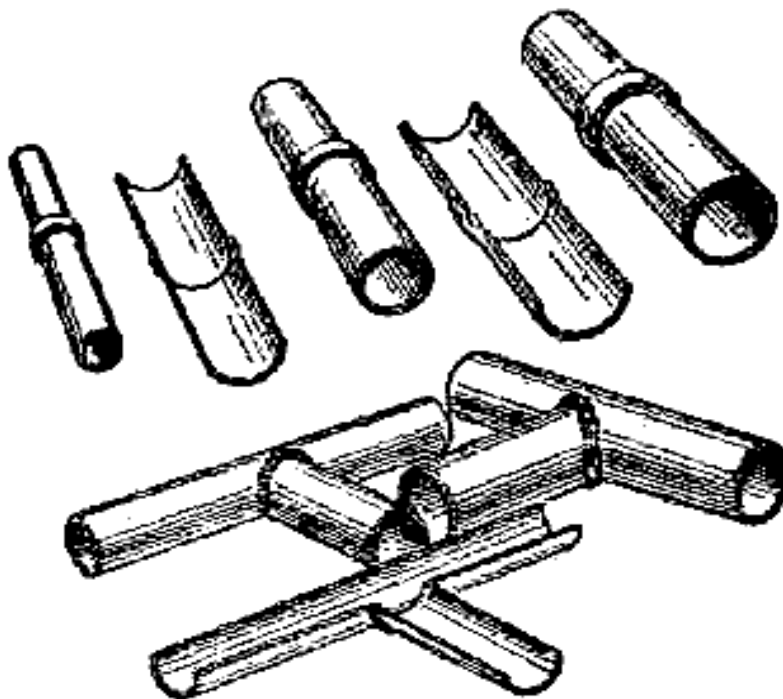


Рисунок 34 - Зразки мідних труб, з'єднаних аргонодуговим зварюванням

4.2.2 Алюміній і його сплави

Загальні відомості. Алюміній є одним з найбільш розповсюджених елементів у природі; він має малу густину, високі електро- і теплопровідність, високу корозійну стійкість в окисних середовищах і стійкість проти переходу в крихкий стан при низьких температурах. Густина алюмінію 2.7 г/см^3 . Температура плавлення $660 \text{ }^\circ\text{C}$. Алюміній має велику спорідненість із киснем, тому завжди покритий щільною плівкою окису алюмінію — Al_2O_3 , температура плавлення якої $2050 \text{ }^\circ\text{C}$. Тугоплавка плівка окису й можливість утворення пор і кристалізаційних тріщин у металі шва — основні труднощі при зварюванні алюмінію.

Плівка окису алюмінію перешкоджає сплавленню металу зварювальної ванни з основним металом, її видалення при зварюванні алюмінію металевими електродами досягається впливом на неї складових флюсу чи покриття електрода, а при аргонодуговому у результаті катодного розпилення. При зварюванні постійним струмом зворотної

полярності “очищувальна” дія струму відбувається протягом усього періоду горіння дуги, а при зварюванні змінним струмом лише в ті напівперіоди, коли виріб є катодом.

Причиною утворення пор у зварних швах є водень, який у зв'язку з різкою зміною розчинності при переході алюмінію з рідкого стану у твердий прагне вийти зовні. Кристалізаційні тріщини в зварних швах чистого алюмінію виникають через підвищений вміст кремнію та зменшуються з введенням в алюміній добавок заліза.

Ручне зварювання вугільним електродом. Зварювання вугільним електродом застосовують при товщині металу від 1.5 до 20 мм і при заварюванні дефектів лиття з алюмінію та його сплавів. Метал товщиною до 2 мм зварюють без оброблення кромки і присадкового дроту. Для попередження виникнення окислів алюмінію в металі шва застосовують флюс АФ-4А.

Ручне дугове зварювання металевим електродом. Для зварювання й наплавлення деталей і конструкцій з чистого алюмінію А6, АДО, АД1 і АД застосовують електроди ОЗА-1 і АФ-4аКР. Зварювання ведуть постійним струмом зворотної полярності при попередньому підігріві листів, що зварюються: при товщині 6 - 8 мм до 200 °С, при товщині 8 - 16 мм до 350 – 400 °С.

Електроди перед зварюванням просушують при температурі 150 — 200° С протягом 2 год. Кромки обробляють при товщині металу більше 20 мм. Зварювання виконують при зазорі між листами 0.5—1 мм із двох сторін. Для зварювання алюмінієвомарганцевого сплаву типу АМц і усунення дефектів місць литва зі сплаву АЛ-9 призначені електроди А-2. Зварювання виконується при попередньому підігріві до 300 — 400 °С (АМц) і 280 — 300 °С (АЛ-9) постійним струмом зворотною полярністю короткою дугою. Для зварювання сплавів АЛ-2, АЛ-4, АЛ-5, АЛ-9 і АЛ-11 призначені електроди ОЗА-2. Зварювання виконують короткою дугою постійним струмом зворотної полярності при підігріві місця зварювання до 250 — 400 °С.

Ручне аргонодугове зварювання. Для зварювання застосовують аргон марок А та Б. Зварювання виконують вольфрамовим електродом на змінному струмі. Видалення окисної плівки відбувається в момент, коли виріб буває катодом, тобто внаслідок катодного розпилення. Якщо стикові з'єднання виконують без оброблення кромки (при товщині металу до 4 мм), то струм підбирають за такою формулою:

$$I=50 \cdot S,$$

де I — зварювальний струм, А; S — товщина металу, мм.

Метали великої товщини зварюють з обробленням кромки шарами. Струм підбирають із розрахунку 35 — 40 А на 1 мм діаметра вольфрамового електрода.

4.2.3 Нікель і його сплави

Загальні відомості. Нікель — метал, що має температуру плавлення $1453\text{ }^{\circ}\text{C}$, густину 8.9 г/см^3 , досить високу стійкість проти корозії на повітрі, пластичність і міцність, а також жароміцність і великий омичний опір. Нікель у техніці використовується в чистому вигляді та у вигляді різних сплавів. Технічно чистий нікель — Н0, Н1, Н3 і Н4. Сплави нікелю бувають міднонікелеві, нікельхромові (ніхроми), нікельмолібденові, нікелькобальтові й ін.

Основні труднощі при зварюванні нікелю виникають через схильність металу шва утворювати пори і кристалізаційні тріщини.

Причинами утворення порожнин у металі шва при зварюванні нікелю є велика розчинність газів при високих температурах, особливо водню і кисню й виділення їх у момент кристалізації.

Причиною виникнення кристалізаційних тріщин у металі шва є утворення легкоплавкої евтектики $Ni-NiS$. Для попередження утворення кристалізаційних тріщин у розплавленій метал вводять елементи, що зв'язують у процесі зварювання сірку в більш тугоплавкі, ніж NiS , сполуки. Такими елементами є марганець і магній, що утворюють із сіркою тугоплавкі з'єднання MnS і MgS . Корисно для цієї мети додати у зварений шов невелику кількість титана. Плівка окису нікелю, що має температуру плавлення $1650\text{ }^{\circ}\text{C}$, тобто вище температури плавлення основного металу, також утруднює зварювання.

Ручне дугове зварювання металевим електродом. Ручне дугове зварювання металевим електродом виконують постійним струмом зворотної полярності короткою дугою. Для зварювання застосовують електроди НЗ7к або «Прогрес-50». Під час зварювання кінцем електрода роблять невеликі поступально-поворотні рухи. При зміні електрода чи випадкових обривах дуги її збуджують, відступаючи на 5 — 6 мм від кратера назад (зачистивши перед цим шов від шлаку).

Кожен наступний шар шва починають зварювати після охолодження зварного з'єднання і ретельного очищення попереднього шару від шлаку й бризків.

Зварні шви, звернені до агресивного середовища, виконують останніми, причому їхні кратери не повинні збігатися з кратерами розташованих нижче шарів

Для зварювання міднонікелевих сплавів постійним струмом зворотної полярності застосовують електроди МЗОК.

Для зварювання литого і кутого нікельмолібденового сплаву (при вмісті молібдену 25 — 30%), що працює в середовищах соляної і сірчаної кислот, використовують електроди ХН-1. Зварювання ведуть короткою дугою постійним струмом зворотної полярності.

Ручне аргонодугове зварювання. Нікель і його сплави зварюють вольфрамовим електродом, що неплавиться, постійним струмом прямої полярності. Щоб попередити утворення порожнин у металі шва, до аргону

додають водень. Поява пір у металі шва можна також усунути введенням до складу дроту ніобію, алюмінію й кремнію, що зв'язують гази.

4.2.4 Титан і його сплави

Титан і його сплави в даний час широко використовуються в спеціальних галузях техніки. Температура плавлення титана 1680°C , щільність 4.5 г/см^3 . Титан має низькотемпературну (α -фазу) і високотемпературну (β -фазу).

Титан має високу хімічну спорідненість із киснем, азотом й воднем: інтенсивне насичення його воднем починається вже при температурі 250°C , киснем — при 400°C і азотом — при 600°C . З підвищенням температури активність титану різко зростає. Швидкість взаємодії титану з киснем у 50 разів вища, ніж з азотом. Кисень легко розчиняється як у α -фазі, так і в β -фазі титану і є сильним стабілізатором α -фази. Азот так само легко розчиняється як і у α -фазі, так і в β -фазі і є сильним стабілізатором α -фази. Титан є єдиним елементом, здатним горіти в азоті. Водень стабілізує β -фазу титану й утворює з титаном тверді розчини й гідрид TiH_2 .

При охолодженні титану нижче $100 - 150^{\circ}\text{C}$ відбувається випадання гідриду (γ -фази), що є причиною утворення холодних тріщин при зварюванні. При повільному охолодженні (γ -фаза виділяється у вигляді тонких пластинок, а при гартуванні — у вигляді високодисперсних частинок.

Азот і кисень різко підвищують міцність титана і знижують його пластичність. Водень у титані впливає головним чином на його схильність до руйнування. Одним з найбільш важливих властивостей титану є його висока корозійна стійкість у багатьох агресивних середовищах. Титан має високу міцність при нормальній і підвищеній температурах.

Основними труднощами при зварюванні титану є:

- висока його активність стосовно кисню, азоту й водню як у розплавленому, так і у твердому стані;
- висока схильність до росту зерна β -фази й перегріву;
- утворення крихкої α' -фази при охолодженні.

Для одержання якісного з'єднання титану в ньому обмежують вміст азоту, кисню, водню і вуглецю; із цією метою захищають метал шва й навколошовної зони при зварюванні інертними газами. Для захисту шва й навколошовної зони від повітря застосовують пальники з козирком. Корінь шва захищають щільним притисканням кромки деталей, що зварюються, до мідної чи сталевий підкладки й подачею інертного газу в підкладку, виготовлену з пористого матеріалу. Механічні властивості й структуру металу шва й навколошовної зони можна регулювати вибором найбільш раціональних режимів і технології зварювання, а також наступною термічною обробкою. Аргонодугове зварювання титану в

інертних газах виконують у середовищі аргону марок А і Б постійним струмом прямої полярності.

При зварюванні посудин чи труб інертний газ підводять усередину виробу. Для зварювання деталей з титану застосовують герметичні камери, заповнені інертним газом.

Питання для самоперевірки

1. Якими способами можна зварювати мідь?
2. Як впливають окис і закис міді на її зварюваність?
3. У чому полягають труднощі зварювання алюмінію, нікелю, титану?
4. Які причини появи пористості при зварюванні міді, алюмінію й титану?

ДОДАТКИ

Основні паспортні дані на металеві електроди для ручного дугового зварювання

Електрод марки МР – 3 типу Э46

Використовується для зварювання конструкцій з вуглецевих сталей марок СтЗсп, СтЗсп і інших в усіх просторових положеннях, крім вертикального зверху вниз. Зварювальний дріт марок Св - 08, Св -08А ГОСТ 2246 - 70. Вид покриття Р.

Склад покриття

Компонент покриття, марка	Масова частка компонентів			ГОСТ, ТУ
	%	Г	см ³	
Рутиловий комп.	50	150	70	22938 – 78
Тальк	10	–	–	21235 – 75
Мармур, М – 92, М – 97	18	54	54	4416 – 73
Каолін	5	15	22	21286 – 75
Феромарганець, ФМн0,5 ФМн1,0	15	45	69	4755 – 80
Целюлоза, ЕЦ	1.5	–	–	ТУ81/68-04-771-69
Кальцієво–натрієве скло рідке (до маси сухої шихти)	30	90	68	ТУ21РСФСР267-75

Вимоги до стержня і готових електродів:

Діаметр стержня <i>мм</i>	Довжина електрода <i>мм</i>	Коефіцієнт маси покриття, %	Група товщини покриття	Допустима масова частка вологи в покритті перед використанням, %
4 – 6	450	35 – 42	Д	0.3

Режим сушіння, прокалювання

Процес	$T, ^\circ C$	Витримка, <i>год.</i>	Допустима масова частка вологи в покритті, %
Сушіння	20 – 25	12 – 24	4.5
Прокалювання	170 – 200	1.5	0.1
Повторне прокалювання	170 – 200	1.5	0.1

Режим зварювання: струм постійний, полярність зворотна і змінна, напруга холостого ходу джерела струму 65 В; рекомендовані значення струму (I) при $U_{зв}=25\div 30$ В:

Положення шва	Діаметр електрода, мм		
	4	5	6
Нижнє	140 – 220	180 – 260	300 – 360
Вертикальне і горизонтальне	140 – 180	160 – 220	–
Верхнє	140 – 180	–	–

Коефіцієнт наплавлення 8.5 г/(А·год). Масові витрати електродів на 1 кг наплавленого металу 1.6 кг.

Механічні властивості:

Метал шва				Зварне з'єднання	
σ_m , МПа	σ_B , МПа	σ_5 , %	a_H , Дж/см ³	σ_B , МПа	Кут згину зварного з'єднання, град
380	460	20	130	460	150

Хімічний склад наплавленого металу:

C	Mn	Si	S	P
			не більше	
0.09 – 0.12	0.5 – 0.8	0.15	0.03	0,03

Виділення шкідливих речовин на 1 кг витрачених електродів MnO_2 – 1.9, аерозолі – 12 г.

Електрод марки АНО – 4с типу Э46

Використовується для зварювання конструкцій із сталей марок Ст3сп і інших вуглецевих сталей. В будь-якому просторовому положенні, крім вертикального зверху вниз. Зварний дріт марок Св - 08А, Св – 08 ГОСТ 2246 - 70. Вид покриття Р.

Склад покриття

Компонент покриття, марка	Масова частка компонента, %	ГОСТ, ТУ
Рутиловий концентрат	44	22938 – 78
Слюда мусковіт	24	14327 – 69
Магнезит сірий кристалічний	15	6419 – 78
Феромарганець, ФМн5.0, ФМн1.0	15	4755 – 80
Целюлоза, ЕЦ	2	ТУ81/68-04-171-69
Натрієво-кальцієве скло рідке (до маси сухої шихти)	24 – 27	ТУ21-01-478-71

Вимоги до стержня і готових електродів

Діаметр стержня <i>мм</i>	Довжина електрода <i>мм</i>	Коефіцієнт маси покриття, <i>%</i>	Група товщини покриття	Допустима макс. частка вологи в покритті перед використанням, <i>%</i>
3 – 4 – 6	350 – 450	35 – 40	Д	0.3

Режим зварювання: струм постійний будь – якої полярності або змінний, напруга холостого ходу джерела живлення дуги 65 В; рекомендовані значення струму (*A*) при $U_{зв}=22\div 30$ В:

Положення шва	Діаметр електрода, <i>мм</i>			
	3	4	5	6
Нижнє	100 – 140	170 – 210	190 – 270	270 – 320
Вертик. і горизонт.	90 – 110	140 – 150	150 – 170	–
Верхнє	100 – 120	140 – 170	–	–

Коефіцієнт наплавлення 8 – 9 (*г/А год*). Масові витрати електродів на 1 кг наплавленого металу 1.7 кг.

Механічні властивості:

Метал шва				Зварне з'єднання		
σ_t , <i>МПа</i>	σ_b , <i>МПа</i>	σ_5 , <i>%</i>	a_n , <i>Дж/см³</i>	σ_b , <i>МПа</i>	Кут згину зварного з'єднання, <i>град</i>	
не менше						
350	460	18	80	460	120	

Хімічний склад наплавленого металу:

<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>S</i>	<i>P</i>
			не більше	
0.06 – 0.1	0.6 – 0.8	0.18	0.04	0.04

Виділення шкідливих речовин на 1 кг витрачених електродів MnO_2 – 0.7, і аерозолі – 7 г.

Електрод марки УОНИ – 13/45 типу Э42А

Використовується для зварювання в усіх просторових положеннях, крім вертикального зверху вниз, сталей марок 09Г2, МС – 1, 10Г2С1Д – 35, 10Г2С1Д – 40, 10ХСНД, 20Л, 25Л, Ст3, Ст3, Ст4 і зварювання поковок зі сталей марок 08ГДН і 08ГДНФ. Зварний дріт марок Св – 0.8А, Св – 0.8 ГОСТ 2246 – 70. Вид покриття Б.

Склад покриття

Компонент покриття, марка	Масова частка компонентів			ГОСТ, ТУ
	%	г	см ³	
Плавиновошпатовий концентрат, ФФС – 97Б, ФФС95	18	54	33	4421 – 78
Феросиліцій, ФС45	3	9	3.1	1415 – 78
Мармур, М – 92, М – 97	18	54	33	4421 – 78
Кальцинована сода	1	3	4.6	5100 – 73
Феромарганець, ФМн0,5 ФМн1,0	2	6	9.2	4755 – 80
Феротитан, Тi0, Тi1	13	39	14	ТУ14-5-105-78
Кальцієво-натрієве скло рідке (до маси сухої шихти)	28 – 30	87 – 90	64 – 69	13079 – 67
Кварцовий пісок	9	27	24.6	4417 – 75
Слюда (мусковіт)	2	6	–	14327 – 69
Карбоксиметилцелюлоза (КМЦ), 85/500	0.5	–	–	ТУ6-05-351-4-79

Вимоги до стержня і готових електродів:

Діаметр стержня мм	Довжина електрода мм	Коефіцієнт маси покриття, %	Група товщини покриття	Допустима масова частка вологи в покритті перед використанням, %
2	300	33 – 48	Д	0.3
3	350			
4 – 5	450			

Режим зварювання: струм постійний зворотної полярності, напруга холостого ходу джерела живлення дуги 65 В; рекомендовані значення струму (А) при $U_{зв}=22\div 26$ В:

Положення шва	Діаметр електрода, мм			
	2	3	4	5
Нижнє	45 – 65	100 – 130	160 – 210	220 - 280
Верхнє	45 – 65	90 – 120	130 – 60	–
Вертикальне й горизонтальне				160 - 210

Коефіцієнт наплавлення 7.5 – 9.5 г/(А год.). Масові витрати електродів на 1 кг наплавленого металу 1.6 кг.

Механічні властивості:

Метал шва				Зварне з'єднання	
$\sigma_{т}$ МПа	$\sigma_{в}$ МПа	σ_{5} %	$a_{т}$ Дж/см ³	$\sigma_{в}$, МПа	Кут згину зварного з'єднання, град
не менше					
320	420	22	140	420	180

Хімічний склад наплавленого металу

C	Mn	Si	S	P
			не більше	
0.12	0.35 – 0.78	0.18 – 0.35	0.03	0.03

Виділення шкідливих речовин на 1 кг витрачених електродів MnO_2 – 0.6, і аерозолі – 16 г.

Електрод марки Э – 138/50н типу Э50А

Використовується для зварювання в будь-якому просторовому положеннях, крім вертикального зверху вниз, конструкцій з вуглецевих сталей марок 09Г2, МС – 1, 10Г2С1Д – 35, 10Г2С1Д – 40, 10ХСНД,

схильних до корозій в морській воді. Зварний дріт марок Св – 10Г, ГОСТ 2246 – 70. Вид покриття Б.

Склад покриття

Компонент покриття, марка	Масова частка компонента, %	ГОСТ, ТУ
Мармур М – 92, М – 97	51,5	4416 – 73
Слюда мусковіт	2.0	14327 – 69
Плавиковошпатовий концентрат ФФС – 97Б, ФКС – 95К	21.0	4421 – 73
Кварцовий пісок	8	4417 – 75
Феротитан Ti0, Ti1	14.5	ТУ14 – 5 – 105 – 78
Натрієво – кальцієве скло рідке (до маси сухої шихти)	26 – 32	13079 – 67
Феросиліцій ФС – 45	1.0	1415 – 78
Кальцинована сода	1.0	5100 – 73
КМЦ 85/500	0.2	ТУ6 – 05 – 351 – 4 – 79
Залізний сурик	0.5	8135 – 74

Вимоги до стержня і готових електродів:

Діаметр стержня, мм	Довжина електрода, мм	Коефіцієнт маси покриття, %	Група товщини покриття	Допустима масова частка вологи в покритті перед використанням, %
3 4 – 5	350 450	30 – 50	Д	0.3

Режим зварювання: струм постійний зворотної полярності, напруга холостого ходу джерела живлення дуги 65 В; рекомендовані значення струму (А) при $U_{зв} = 22 \div 26$ В:

Положення шва	Діаметр електрода, мм		
	3	4	5
Нижнє	100 – 130	160 – 210	220 – 280
Вертикальне і горизонтальне	130 – 160	150 – 210	160 – 210

Коефіцієнт наплавлення 8.5 – 9.5 г/(А год.). Масові витрати електродів на 1 кг наплавленого металу 1.7 кг.

Механічні властивості

Метал шва			
σ_m , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	a_{10} , Дж/см ³

не менше			
410	510	24	140

Хімічний склад наплавленого металу

<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Ni</i>	<i>Si</i>	<i>S</i>	<i>P</i>
				не більше	
0.11	0.45 – 0.75	0.7 – 1.1	0.15 – 0.35	0.03	0.03

Електрод марки ЦЛ - 45

Використовується для зварювання конструкції з легованих хромомолібденових жаростійких сталей (марок 12Х1МФ, 15Х1М1Ф, і ін.) з мінімальним тимчасовим опором розриву до 500 МПа, що працює при температурі до 585 °С; зварювальний дріт марки Св-08ХМ, ГОСТ 2246-70. Вид покриття Б.

Склад покриття

Компонент покриття, марка	Масова частка компонента, %	ГОСТ, ТУ
Мармур М – 97Б, М – 97К	50	4416 – 73
Слюда мусковіт	2.0	14327 – 69
Плавиковошпатовий концентрат ФФС – 97А	23	4421 – 73
Кварцовий пісок	5.0	4417 – 73
Феротитан Ti0, Ti1	6.0	ТУ14 – 5 – 105 – 78
Натрієво-кальцієве скло рідке (до маси сухої шихти)	23 – 27	ТУ21 – 01 – 478 – 71
Феросиліцій ФС – 45	2.5	1415 – 70
Рутиловий концентрат	7.0	22938 – 78
Феромарганець ФМн 0,5	3.2	4755 – 80
Феромолібден ФМ1, ФМ2	1.0	4759 – 79
Альгімат кальцію	1.5	---
Ферованадій ФВ35А	0.8	ТУ14 – 5 – 98 – 78

Вимоги до стержня і готових електродів:

Діаметр стержня, <i>мм</i>	Довжина електрода, <i>мм</i>	Коефіцієнт маси покриття,	Група товщини покриття	Допустима масова частка вологи в покритті перед використанням, %
-------------------------------	---------------------------------	---------------------------	------------------------	--

		%		
3	300	40 – 45	С	≤0,3
4 – 5	350			

Режим зварювання: струм постійний зворотної полярності, напруга холостого ходу джерела живлення дуги 60 В; рекомендовані значення струму (А) при $U_{зв}=23\div25$ В:

Положення шва	Діаметр електрода, мм		
	3	4	5
Нижнє	100 – 120	140 – 160	180 – 220
Вертикальне і горизонтальне	90 – 110	120 – 140	160 – 180
Верхнє	80 – 110	110 – 130	–

Коефіцієнт наплавлення 8 – 10.5 г/(А год.). Масові витрати електродів на 1 кг наплавленого металу 1.65 кг.

Механічні властивості

Метал шва			
σ_m , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	a_{10} , Дж/см ³
не менше			
320	500	18	90

Хімічний склад наплавленого металу:

С	Mn	Cr	Mo.	Si	V	S	P
						не більше	
0.07 – 0.12	0.6 – 0.9	0.85 – 0.15	0.7 – 0.95	0.12 – 0.15	0.08 – 0.18	0.03	0.03

Виділення шкідливих речовин на 1 кг витрачених електродів Mn – 1.5 і HF – 2.5 г.

Електрод марки ЭА – 395/5 типу Э – 11Х15Н26М6АГ2

Використовується для зварювання аустенітних, жаростійких, середньолегованих, високоміцних і різномірних сталей. Зварювальний дріт марки Св – 10Х16Н25АМ6 ГОСТ 2246 – 70. Вид покриття Б.

Склад покриття

Компонент покриття, марка	Масова частка компонента, %	ГОСТ, ТУ
Мармур М – 92, М – 97	50	4416 – 73
Плавиговошпатовий концентрат ФФС – 97, ФФС – 95	27	4421 – 73
Феротитан Тi0, Тi1	5	ТУ14 – 5 – 105 – 78
Натрієво-кальцієве скло рідке (до маси сухої шихти)	30 – 35	13479 – 67
Феросиліцій ФС – 45	5	1415 – 78
Металевий марганець, Мр00, Мр0	5	6008 – 75
Двооксид титану, ТЕ	5	ТУ6 – 10 – 1363 – 73
Вуглецевий калій, (поташ)	3	10690 – 73

Вимоги до стержня і готових електродів:

Діаметр стержня, мм	Довжина електрода, мм	Коефіцієнт маси покриття, %	Група товщини покриття	Допустима масова частка вологи в покритті перед використанням, %
3 4 – 5	300 350	30 – 40	С	0.3

Режим зварювання: струм постійний зворотної полярності, напруга холостого ходу джерела живлення дуги 65 В; рекомендовані значення струму (А) при $U_{зв} = 22 \div 26$ В:

Положення шва	Діаметр електрода, мм		
	3	4	5
Нижнє	80 – 100	120 – 150	150 – 180
Вертикальне і горизонтальне	70 - 90	100 – 130	–

Коефіцієнт наплавлення 10.9 г/(А год). Масові витрати електродів на 1 кг наплавленого металу 1.6 кг.

Механічні властивості:

σ_B , МПа	σ_5 , %	a_{10} , Дж/см ³
620	30	12

Хімічний склад наплавленого металу

<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo.</i>	<i>Si</i>	<i>Ni</i>	<i>N</i>	<i>S</i>	<i>P</i>
							не більше	
0.09	1.6	15.5	5.8	0.70	25.0	0.12	0.02	0.03

Електрод марки 400/10У типу Э – 07Х19Н11МЗГ2Ф

Використовується для зварювання корозійностійких сталей марок 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т, 12Х18Н10Т, 12Х18Н12Т, що працюють в контакті з агресивним середовищем при температурі до 350 °С і які не піддаються термообробці після зварювання. Зварювальний дріт марки 04Х19Н11МЗ ГОСТ 2246 – 70, вид покриття Б.

Склад покриття

Компонент покриття, марка	Масова частка компонента, %	ГОСТ, ТУ
Мармур М92П, М97Б	37	4416 - 73
Плавиковошпатовий концентрат ФФС - 97Б, ФКС – 95Б	32	ТУ6 - 10 - 1363 - 73 4421 - 73
Натрієво-кальцієве скло рідке (до маси сухої шихти)	30 – 35	13479 – 67
Феросиліцій ФС – 45	3	1415 – 70
Металевий марганець, Мр00, Мр0	10	6008 – 75
Двооксид титану, ТЕ	5	---
Феромолібден, ФМ1, ФМ2	1.5	4759 – 79
Ферованадій ФБД-35А, ФБД-35В	6	ТУ14 - 5 - 98 - 78
Хром металевий ХО, Х1	5	5905 - 67
Бентоніт	до 2	7032 - 75

Вимоги до стержня і готових електродів

Діаметр стержня, мм	Довжина електрода, мм	Коефіцієнт маси покриття, %	Група товщини покриття	Допустима масова частка вологи в покритті перед використанням, %
2 - 3 4 – 5	250 350	30 – 40	С	0.3

Режим зварювання: струм постійний зворотної полярності, напруга холостого ходу джерела живлення дуги 65 В; рекомендовані значення струму (А) при $U_{зв}=20\div 26$ В:

Положення шва	Діаметр електрода, мм			
	2	3	4	5
Нижнє	40 – 55	70 – 90	120 – 140	140 – 160
Верхнє	30 – 40	70 – 80	100 – 120	–
Вертикальне і горизонтальне	30 – 40	65 – 80	90 – 120	–

Коефіцієнт наплавлення 12 з/(А год.). Масові витрати електродів на 1 кг наплавленого металу 1.8 кг.

Механічні властивості

Метал шва				Зварне з'єднання	
σ_m , МПа	σ_B , МПа	σ_5 , %	a_n , Дж/см ³	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	Кут згину зварного з'єднання, град
350	350	25	90	550	160

Хімічний склад наплавленого металу

C	Mn	Cr	Mo.	Si	Ni	V	S	P
							не більше	
0.07	2.4	18	2.5	0.48	10.5	0.52	0.028	0.028

Спеціальні характеристики: наплавлений метал має високу стійкість проти утворення гарячих тріщин; структура наплавленого металу аустенітно-феритна; масова частка феритної фази в металі шва 2 – 8 %.

Електрод марки ЦТ - 28 типу Э – 08X14H65M15B4Г2

Використовується для зварювання різномірних металів (перлітних, хромистих, аустенітних сталей з сплавами на нікелевій основі), а також сплавів на нікелевій основі марок ХН78Т, ХН77ТЮ, ХН70ВМЮТ та інші. Зварювальний дріт марки Св - 06X15H60M15 ГОСТ 2246 - 70, вид покриття Б.

Склад покриття

Компонент покриття, марка	Масова частка компонента, %	ГОСТ, ТУ
Мармур М – 97	35	4416 – 73
Плавиковошпатовий концентрат ФФС – 97А	35	4421 – 73
Натрієво-кальцієве скло рідке (до маси сухої шихти)	25 – 30	13079 – 67
Феросиліцій ФС – 45	1	1415 – 78
Металевий марганець, Мр00, Мр0	7	6008 – 75
Слюда (мусковіт)	2	14327 – 69
Феровольфрам, В1А, В1	20	17293 - 71

Вимоги до стержня і готових електродів

Діаметр стержня, мм	Довжина електрода, мм	Коефіцієнт маси покриття, %	Група товщини покриття	Допустима масова частка вологи в покритті перед використанням, %
3	300	30 – 40	С	0.3
4	350			

Режим зварювання: струм постійний зворотної полярності, напруга холостого ходу джерела живлення дуги 65 В; рекомендовані значення струму (А) при $U_{зв}=22\div 26$ В:

Положення шва	Діаметр електрода, мм	
	3	4
Нижнє	80 – 100	90 – 101
Вертикальне і горизонтальне Верхнє	70 – 100	100 – 125

Коефіцієнт наплавлення 10.5 г/(А год.). Масові витрати електродів на 1 кг наплавленого металу 1.75 кг.

Механічні властивості

Метал шва і зварне з'єднання				
Температура випробування, °С	σ_m , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	ψ , %
20	340	500	14	25
700	280	440	18	27

Хімічний склад наплавленого металу

C	Mn	Cr	Mo	Si	Ni	W	S	P
							не більше	
0.08	2	13	15	0.25	Основа	4	0.01	0.01

Електрод марки 12АН/ЛИВТ типу Э – 95Х7Г5С

Використовується для зносостійких наплавлень на робочій поверхні деталі, що піддаються спільній дії ударів і значному стерттю об породу чи метал, а також при великих питомих навантаженнях; зварювальний дріт марки Св – 08, Св – 08А ГОСТ2246 – 70, вид покриття Б.

Склад покриття

Компонент покриття, марка	Масова частка компонентів			ГОСТ, ТУ
	%	ρ	$см^3$	
Плавиновошпатовий концентрат, ФФС – 97Б, ФФС95	16	48	29,1	4421 – 78
Феросиліцій, ФС45	3	9	3,1	1415 – 78
Мармур, М – 92, М – 97	20	60	60	4416 – 73
Польовий шпат	8	24	25	4422 – 75
Феромарганець, доменний Мн5	22	66	16.4	4755 – 80
Ферохром, ФХ650	29	87	23,2	4757 – 79
Графіт сріблястий	2	6	10	5279 – 74
Натрієве скло рідке (сухої маси шихти)	25 – 32	75 – 90	57.7 – 60.3	13079 – 67

Вимоги до стержня і готових електродів

Діаметр стержня <i>мм</i>	Довжина електрода <i>мм</i>	Коефіцієнт маси покриття, %	Група товщини покриття	Допустима масова частка вологи в покритті перед використанням, %
4 – 5	450	58 – 60	Д	0.5

Режим сушіння, прокалювання

Процес	$T, ^\circ C$	Витримка, год	Допустима масова частка вологи в покритті, %
Сушіння	20 – 25	12 – 24	≤ 4.5
Прокалювання	250 – 270	0.5 – 0.6	≤ 0.2
Повторне прокалювання	100 – 150	0.4 – 0.6	≤ 0.2

Режим зварювання: струм постійний зворотної полярності, чи змінний, напруга холостого ходу джерела живлення дуги 65 В; рекомендовані значення струму (I) при $U_{зв} = 20 \div 22$ В:

Положення шва	Діаметр електрода, мм	
	4	5
Нижнє	150 – 160	200 – 210

Коефіцієнт наплавлення 8 г/(А год.). Масові витрати електродів на 1 кг наплавленого металу 1.6 кг, твєдїсть другого шару наплавленого металу за Роквелом (шкала С) 25 – 30.

Хїмічний склад наплавленого металу

C	Mn	Cr	Si	S	P
				не більше	
0.8 – 1.1	4 – 5	6 – 8	1.2 – 1.8	0.03	0.04

Спеціальні характеристики: наплавлення повинно проводитись короткою дугою не менше ніж в два шари.

Електрод марки 13КМ/ЛИВТ типу Э– 80Х4С

Використовується для зносостійких наплавлень на робочій поверхні деталі, які піддаються дії абразивного зношування без ударів при малих питомих навантаженнях і відсутності значних ударів. Зварювальний дріт марки Св – 08, Св – 08А ГОСТ2246 – 70, вид покриття Б.

Склад покриття.

Компонент покриття, марка	Масова частка компонентів			ГОСТ, ТУ
	%	г	см ³	
Плавіковошпатовий концентрат, ФФС - 97Б, ФФС - 95Б	20	60	36.4	4421 – 78
Феросиліцій, ФС45	10	30	10.4	1415 – 78
Мармур, М – 92, М – 97	33	99	99	4416 – 73
Польовий шпат	12	36	37.2	4422 – 73
Ферохром	20	60	16	4757 – 79
Графіт сріблястий	5	15	25	5279 – 74
Натрієве скло рідке (до сухої)	25 – 32	75 – 96	57.7 – 73.7	13079 –

маси шихти)				67
-------------	--	--	--	----

Вимоги до стержня і готових електродів

Діаметр стержня, мм	Довжина електрода, мм	Коефіцієнт маси покриття, %	Група товщини покриття	Допустима масова частка вологи в покритті перед використанням, %
4 – 5	450	38 – 42	Д	0.5

Режим сушіння, прокалювання

Процес	$T, ^\circ C$	Витримка, год	Допустима масова частка вологи в покритті, %
Сушіння	20 – 25	24	4.5
Прокалювання	250 – 270	0.6 – 0.7	0.2
Повторне прокалювання	150 – 200	1 – 2	0.2

Режим зварювання: струм постійний зворотної полярності або змінний, напруга холостого ходу джерела живлення дуги 65 В; рекомендовані значення струму (А) при $U_{36} = 20 \div 22$ В:

Положення шва	Діаметр електрода, мм	
	4	5
Нижнє	140 – 150	190 – 200

Коефіцієнт наплавлення 8.5 г/(А год.). Масові витрати електродів на 1 кг наплавленого металу 1.75 кг, твєдїсть другого шару наплавленого металу за Роквелом (шкала С) 58 – 62

Хїмїчний склад наплавленого металу

C	Mn	Cr	Si	S	P
				не бїльше	
0.7 – 0.9	0.6 – 1	3 – 4	1 – 1.5	0.03	0.04

Спеціальні характеристики: наплавлення повинно проводитись короткою дугою не менше нїж в два шари.

Електрод марки Т - 620 типу Э – 320Х23С2ГТР

Використовується для наплавлення швидкозношувальних деталей машин зі сталі і чавуну, що працюють в умовах абразивного стирання при наявності питомого навантаження. Зварювальний дріт марки Св – 08, Св – 08А, ГОСТ2246 – 70, вид покриття Б.

Склад покриття

Компонент покриття, марка	Масова частка компонента, %	ГОСТ, ТУ
Феротитан, Ti0, Ti1	15	ТУ14 – 8 – 105 – 78
Ферохром, ФХ100, ФХ200	75	4757 – 79
Натрієве скло рідке (до маси сухої шихти)	28 – 30	13079 – 67
Графіт сріблястий	5	5279 – 74
Карбонат бору	5	–
Силікат натрію (в порошку)	11	13079 – 67
Феровольфрам, В1А, В1	20	17293 – 71

Вимоги до стержня і готових електродів:

Діаметр стержня <i>мм</i>	Довжина електрода <i>мм</i>	Коефіцієнт маси покриття, %	Група товщини покриття	Допустима масова частка вологи в покритті перед використанням, %
4 – 5	450	160 – 165	Г	0.5

Режим зварювання: струм постійний, напруга холостого ходу джерела живлення дуги 65 В; рекомендовані значення струму (А) при $U_{36}=20\div 25$ В:

Положення шва	Діаметр електрода, <i>мм</i>	
	4	5
Нижнє	200 – 220	250 – 270

Коефіцієнт наплавлення 8.5 г/(А год) Масові витрати електродів на 1 кг наплавленого металу 1.3 кг, твєдїсть другого шару наплавленого металу за Роквелом (шкала С) 55 – 62

Хїмїчний склад наплавленого металу

Масова частка елемента, %					
<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Si</i>	<i>Zi</i>	<i>B</i>

3.2	1.2	23	2.2	1.3	1.5

Спеціальні характеристики: наплавлений метал термічній обробці не піддається і не схильний до утворення тріщин.

Електрод марки ЦН - 2 типу Э – 190К62Х 29135С2

Використовується для наплавлення ущільнених поверхонь дрібно- і великогабаритних деталей арматури котлів, що працюють при температурі до 600°C і тиску не більше 80 МПа . Замість зварювального дроту використовуються литі стержні ВЗК ОСТ 1.90078 – 72. Вид покриття Б.

Склад покриття

Компонент покриття, марка	Масова частка компонента, %	ГОСТ, ТУ
Мармур, М –92, М – 97	46	4416 – 73
Плавкошпатовий концентрат, ФФС –97Б, ФФС – 95Б	28	4421 – 73
Натрієве скло рідке (до маси сухої шихти)	30	13079 – 67
Графіт	14	5279 – 74
Порошок алюмінієвий, ПА1	12	11069 – 74

Вимоги до стержня і готових електродів

Діаметр стержня, мм	Довжина електрода, мм	Коефіцієнт маси покриття, %	Група товщини покриття	Допустима масова частка вологи в покритті перед використанням, %
4	250	20 – 25	С	0.3
5	300			
6	350			

Електроди виготовляються методом занурювання.

Режим зварювання: струм постійний зворотної полярності, напруга холостого ходу джерела живлення дуги 65 В ; рекомендовані значення струму (A) при $U_{зв} = 22\div 25\text{ В}$:

Положення шва	Діаметр електрода, мм		
	4	5	6
Нижнє	120 – 140	180 – 200	220 - 240

Коефіцієнт наплавлення $12\text{ г}/(A\text{ год.})$. Масові витрати електродів на 1 кг наплавленого металу 1.35 кг , твєдїсть наплавленого металу за Роквелом (шкала С) $40 – 50$.

Хімічний склад наплавленого металу

Масова частка елемента, %					
<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Si</i>	<i>Co</i>	<i>W</i>
1.6 – 2.3	0.2	26 – 32	1.5 – 2.26	59 – 65	4 – 5

Спеціальні характеристики: в умовах дії парового середовища при температурі 600 °С; тиску 80 МПа; наплавлений метал характеризується стійкістю проти ерозії, міжкристалітної й загальної корозії та окислостійкості. Наплавка здійснюється з попереднім і поступовим нагріванням до 600 °С.

Електрод марки ОМЧ - 1

Використовується для зварювання й наплавлення чавунних деталей і виливок з сірого чавуну різних марок із попереднім нагріванням. Замість зварювального дроту використовуються литі чавунні стержні марки Б ГОСТ 2671 – 70.

Склад покриття

Компонент покриття, марка	Масова частка компонента, %	ГОСТ, ТУ
Мармур, М – 97Б, М – 92П або крейда	25	4416 – 78, 4415 – 75
Феромарганець, ФМн0,5	9	4455 - 80
Натрієве скло рідке (до маси сухої шихти)	30 – 35	ТУ21 – 01 – 267 – 69
Графіт сріблястий	41	5279 – 74
Польовий шпат	25	4422 – 73

Вимоги до стержня і готових електродів

Діаметр стержня, мм	Довжина електрода, мм	Коефіцієнт маси покриття, %	Група товщини покриття	Доп. масова частка вологи в покритті, %
6 8 – 10	350 450	10 – 15	М	≤0.3

Режим зварювання: струм постійний або змінний, напруга холостого ходу джерела живлення дуги 65 В; рекомендовані значення струму (*I*) при $U_{36}=24\div 26$ В:

Положення шва	Діаметр електрода, мм		
	6	8	10

Нижнє	250 – 350	350 – 450	450 – 550
-------	-----------	-----------	-----------

Коефіцієнт наплавлення 15.2 г/(А год.). Масові витрати електродів на 1 кг наплавленого металу 1.3 кг, твердість наплавленого металу *НВ* 200.

Хімічний склад наплавленого металу

C	Mn	Si	S	P
			не більше	
3.45	0.65	4.25	0.07	0.04

Спеціальні характеристики: зварювання ведеться з місцевим чи загальним нагріванням до 400 – 600 °С. Зварювання варто проводити короткими валиками довжиною 25 – 35 мм і шириною, яка дорівнює 2÷3 діаметрам електрода, з перекриттям кожного попереднього валика наступним на 0.5 його ширини.

Електрод марки ЦЧ - 4

Використовується для зварювання конструкції з високостійкого чавуну з кулеподібним графітом або з парою чавуну з пластинчатим графітом, а також чавуну у складі зі сталю. Вид покриття Б.

Склад покриття

Компонент покриття, марка	Масова частка компонента, %	ГОСТ, ТУ
Мармур, М – 97	6	4416 – 73
Плави́кошпатовий компонент, ФФС – 97А	16	4421 – 73
Натрієве скло рідке (до маси сухої шихти)	26 – 30	13079 – 67
Ферованадій, ФВ35А, ФВ35В	70	ТУ 14 – 5 – 98 – 78
Феросиліцій, ФС45	4	1415 – 78
Вуглекислий калій (поташ)	4	10690 – 73

Вимоги до стержня і готових електродів

Діаметр стержня, мм	Довжина електрода, мм	Коефіцієнт маси покриття, %	Група товщини покриття	Допустима масова частка вологи в покритті перед використанням, %

3	350	55 – 60	Д	≤0,3
4 – 5	450			

Режим зварювання: струм постійний зворотної полярності, напруга холостого ходу джерела живлення дуги 65 В; рекомендовані значення струму (*A*) при $U_{зв}=20\div 22$ В:

Положення шва	Діаметр електрода, мм		
	3	4	5
Нижнє	90 – 110	120 – 140	150 – 170

Коефіцієнт наплавлення 9 г/(А год.). Масові витрати електродів на 1 кг наплавленого металу 1.2 кг.

Хімічний склад наплавленого металу

<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>V</i>	<i>S</i>	<i>P</i>
				не більше	
0.15	0.5	0.6	9.5	0.04	0.04

Спеціальні характеристики: зварювання варто проводити з мінімальним проплавленням чавуну, без нагрівання або з попереднім нагріванням виробу до 150 – 250 °С.

Електрод марки ОЗА - 1

Використовується для зварювання і наплавлення алюмінію марки А1, АД0, АД1, АД. Зварювальний дріт марки Св – А5 ГОСТ 7871 – 75.

Склад покриття

Компонент покриття, марка	Масова частка компонента, %	ГОСТ, ТУ
Каріоліт	25.0	10561 – 80
Хлористий калій	9.0	4234 – 77
Флюс, АФ – 4А	65.5	–
Губчатий титан	0.5	17746 – 72
Карбоксиметилцелюлоза 20% - ний розчин	12 – 15	ТУ 6 – 05 – 351 – 4 – 79

Вимоги до стержня і готових електродів

Діаметр стержня, мм	Довжина електрода, мм	Коефіцієнт маси покриття,	Група товщини
---------------------	-----------------------	---------------------------	---------------

		%	покриття
4 – 6	350	10	М

Режим зварювання: струм постійний зворотної полярності, рекомендовані значення струму (I) на дузі:

Положення шва	Діаметр електрода, мм		
	4	5	6
Нижнє	120 – 160	150 – 220	200 – 300

Коефіцієнт наплавлення 6.32 г/(А год.). Масові витрати електродів на 1 кг наплавленого металу 2.3 кг.

Механічні властивості

Зварні з'єднання	
σ_B , МПа	Кут згину зварного з'єднання, градус
6.5 – 8.5	180

Хімічний склад наплавленого металу

Масова частка елемента, %					
Ti	Fe	Si	Cu	Сума домішок	Al
0.15 – 0.25	0.25 – 0.50	0.20 – 0.55	0.01 – 0.10	0.4 – 1.2	Інше

Спеціальні характеристики: Схильність до утворення пор і тріщин помірна; зварювання проводити короткою дугою з попереднім підігрівом місця зварювання до 250 – 400 °С у залежності від товщини зварюваних деталей.

Електрод марки “Комсомолец – КО”

Використовується для зварювання міді, з маловуглецевою сталлю і наплавленням міді на сталь. Зварювальний дріт з міді М -1 ГОСТ 16130 – 72. Вид покриття Б.

Склад покриття

Компонент покриття, марка	Масова частка компонента, %	ГОСТ, ТУ
Феромарганець, ФМн 0,5; Мн 1,0	47.5	4755 – 80
Плавишкошпатовий концентрат ФФС – 97А	12.5	4421 – 73
Польовий шпат	15.0	4422 – 73

Кременійова мідь	25.0	–
Натрієве скло рідке (до маси сухої шихти)	25.0	13079 – 67

Вимоги до стержня і готових електродів

Діаметр стержня, мм	Довжина електрода, мм	Коефіцієнт маси покриття, %	Група товщини покриття	Допустима масова частка вологи в покритті перед використанням, %
3; 4 – 5	400 – 450	25	С	0.3

Режим зварювання: струм постійний зворотної полярності, напруга холостого ходу джерела живлення дуги 65 В; рекомендовані значення струму (А) при $U_{зв}=18\div 20$ В:

Положення шва	Діаметр електрода, мм		
	3	4	5
Нижнє	90 – 110	120 – 140	150 – 180

Коефіцієнт наплавлення 14 г/(А год.). Масові витрати електродів на 1 кг наплавленого металу 1.4 кг.

Метал шва			Зварне з'єднання	
σ_B , МПа	σ_5 , %	a_n , Дж/см ³	σ_B , МПа	Кут згину зварного з'єднання, град
270	23	50	270	160

Хімічний склад наплавленого металу

Mn	Si	Fe	Cu
2.2	0.7	1.4	що залишилось

Спеціальні характеристики: при зварюванні листів товщиною більше 6 – 8 мм треба проводити нагрівання основного металу до 300 – 400 °С, зварювання варто виконувати короткою дугою; схильність до виникнення тріщин помірна; зварювання проводити короткою дугою з попереднім нагріванням місця зварювання до 250 – 400 °С в залежності від товщини зварюваних деталей.

Електрод марки МН - 5

Використовується для зварювання мідно-нікелевих сплавів, мідно-нікелевого сплаву з латунню і алюмінієво-марганцевою бронзою, а також для зварювання труб з вказаних сплавів. Зварювальний дріт марки МНЖ5 – 1 ГОСТ 16130 – 72. Вид покриття Р.

Склад покриття

Компонент покриття, марка	Масова частка компонента, %	ГОСТ, ТУ
Марганцева руда	17.5	4418 – 75
Плави́кошпатовий компонент, ФФС – 97А, ФФС – 97Б	32.1	4421 – 78
Феросиліцій, ФС – 45	32.1	1415 – 78
Графіт сріблястий	16.1	5279 – 74
Алюмінієвий порошок, Аж0, Аж1	2.2	9849 – 74
Натрієве скло рідке (до маси сухої шихти)	55 – 60	13079 – 67

Вимоги до стержня і готових електродів

Діаметр стержня, мм	Довжина електрода, мм	Коефіцієнт маси покриття, %	Група товщини покриття	Допустима масова частка вологи в покритті перед використанням, %
3	250	10 – 12	М	≤ 0.3
4	300			
5	350			

Режим зварювання: струм постійний зворотної полярності, напруга холостого ходу джерела живлення дуги 65 В; рекомендовані значення струму (А) при $U_{зв} = 18 \div 20$ В:

Положення шва	Діаметр електрода, мм		
	2	4	5
Нижнє	120 – 140	160 – 180	200 – 220

Коефіцієнт наплавлення 12 г/(А год). Масові витрати електродів на 1 кг наплавленого металу 1.4 кг.

Механічні властивості

Зварні з'єднання

<i>б_B</i> , МПа	Кут згину зварного з'єднання, град	<i>б₅</i> , %
250	180	22

Хімічний склад наплавленого металу

Масова частка елемента, %					
<i>C</i>	<i>Fe</i>	<i>Si</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Ni</i>
0.04	0.9	0.3	90.0	0.45	5.0

Спеціальні характеристики: корозійна стійкість задовільна; зварювання проводити короткою дугою за один прохід при поступальному русі електрода з максимально можливою швидкістю.

Електрод марки ЭПС - 52

Використовується для підводного зварювання конструкцій з низьковуглецевих і низьколегованих сталей. Зварювальний дріт марки Св – 08 Св – 08ГА ГОСТ 2246 – 70. Вид покриття Р.

Склад покриття

Компонент покриття, марка	Масова частка компонента, %	ГОСТ, ТУ
Феромарганець, ФМн 0,5; ФМн 1,0	30	4755 – 80
Феротитан, Тi0, Тi1	5	ТУ 14 – 5 – 105 – 78
Двооксид титану	3	ТУ 6-10-1363-73
Гематит (залізна руда)	28	МРТУ 14-4р-64
Польовий шпат	29	4422 – 73
Натрієве скло рідке (до маси сухої шихти)	20 – 25	13079 – 67
Крохмаль	5	7699 – 78

Вимоги до стержня і готових електродів

Діаметр	Довжина	Коефіцієнт	Група товщини
---------	---------	------------	---------------

стержня, мм	електрода, мм	маси покриття, %	покриття
3	350	35 – 45	С
4 - 5	450		

Режим зварювання: струм постійний прямої полярності або змінний; напруга холостого ходу джерела живлення дуги 70 В; рекомендовані значення струму (I) при $U_{зв} = 20 \div 24$ В:

Положення шва	Діаметр електрода, мм		
	3	4	5
Нижнє	120 – 140	160 – 200	260 – 300
Вертикальне, горизонтальне	100 – 120	140 – 180	240 – 280
Верхнє	90 – 120	120 – 160	220 - 260

Коефіцієнт наплавлення 6 - 8 г/(А год.). Масові витрати електродів на 1 кг наплавленого металу 1.6 кг.

Механічні властивості

Метал шва			Зварне з'єднання	
$\bar{\sigma}_b$, МПа	$\bar{\sigma}_5$, %	$a_{нв}$, Дж/см ³	$\bar{\sigma}_b$, МПа	Кут згину зварного з'єднання, град
400	5	80	400	100

Спеціальні характеристики: зварювання проводити по можливості короткою дугою.

Електрод марки ЕПР - 1

Використовується для роз'єднання металевих конструкцій шляхом різання під водою. Стержень електрода трубчатий зі сталі марки Ст 10 ГОСТ 1050 – 74.

Склад покриття

Компонент покриття, марка	Масова частка компонента, %	ГОСТ, ТУ
Мармур, М – 97	18	4416 – 73
Феросиліцій, ФС – 75	25	4415 – 78
Польовий шпат	27	4422 – 73

Вуглецевий калій (поташ)	5	10690 – 73
Крохмаль	25	7699 – 68
Натрієве скло рідке (до маси сухої шихти)	25 – 30	13079 – 67

Вимоги до стержня і готових електродів

Діаметр стержня, мм	Довжина електрода, мм	Коефіцієнт маси покриття, %	Група товщини покриття
10	450	28 – 32	С

Режим різання: струм постійний прямої полярності, напруга холостого ходу джерела живлення дуги 70 В, діаметр електрода 8 – 10 мм.

Товщина ріжучого металу, мм	Струм, А	Тиск кисню, МПа
5 – 10	200 – 230	0.15 – 0.20
10 – 15	230 – 260	0.20 – 0.30
15 – 20	260 – 290	0.30 – 0.45

Масова витрата електродів на 1 кг наплавленого металу 0.4 кг.

Спеціальні характеристики: різання проводиться по можливості короткою дугою.

Електрод марки АНО – 9 типу Э50А

Використовується для зварювання вертикальних швів в конструкціях з вуглецевих і низьколегованих сталей способом зверху вниз. Можливе зварювання і в інших положеннях. Зварний дріт марок Св – 08, Св – 08А, Св – 08АА ГОСТ 2246 – 70. Вид покриття Б.

Склад покриття

Компонент покриття, марка	Масова частка компонента, %	ГОСТ, ТУ
Мармур, електродний М – 97, М – 92	55	1416 – 73*
Феросиліцій, ФС – 75	13	4415 – 78
Феромарганець, ФМн0,5 ФМн1,0	5	4755 – 80
Плавишкошпатовий концентрат, ФКС – 95А, ФКС – 95Б	7	4421 – 73
Слюда, (мусковіт)	3	14327 – 69*

Залізний порошок, ПЖ – 1, ПЖ – 2	15	9849 – 74*
Алюмінієвий порошок, ПА – 4, ПАП	1.0	11069 – 74*
Целюлоза, ЕЦ	1.0	ТУ81/68-04-171-69
Натрієво-калієве скло рідке (до маси сухої шихти)	21 – 25	ТУ 21 - 01 - 478 - 71
Карбоксиметилцелюлоза очищена або технічна (більше 100%, 85/500)	0.5	ТУ 6-0.5-351-4-79

Вимоги до стержня і готових електродів

Діаметр стержня, мм	Довжина електрода, мм	Коефіцієнт маси покриття, %	Група товщини покриття	Допустима масова частка вологи в покритті перед використанням, %
4 – 5	450	35 – 40	Д	0.3

Режим зварювання: струм постійний зворотної полярності або змінний; напруга холостого ходу джерела живлення дуги 65 В, рекомендовані значення струму (A) при $U_{зв} = 23 \div 26$ В:

Механічні властивості

Метал шва				Зварне з'єднання	
σ_T , МПа	σ_B , МПа	σ_5 , %	a_H , Дж/см ³	σ_B , МПа	Кут згину зварного з'єднання, град
не менше					
400	500	22	130	500	150

Хімічний склад наплавленого металу

C	Mn	Si	S	P
			не більше	
0.06 – 0.1	0.9 – 1.2	0.3 – 0.56	0.04	0.04

Виділення шкідливих речовин на 1 кг витрачених електродів при зварюванні на постійному струмі: MnO_2 5.6 і аерозолі 16.0.

Електрод марки ЦЛ – 51

Використовується для зварювання конструкцій з високолегованої сталі марок 00X12H3Д. Зварний дріт марок Св – 01X12H2 - ВІ. Вид покриття БР.

Склад покриття

Компонент покриття, марка	Масова частка компонента, %	ГОСТ, ТУ
Мармур, М – 97	35	1416 – 73*
Рутиловий концентрат,	26.5	22938 – 78
Плавишкошпатовий концентрат, ФКС – 95А, ФКС – 95Б	35	4421 – 73
Хром металевий, Х0 , Х1	51.0	5905 – 78
Альгінат кальцію, С/YSF	1.5	AYL (Англія)
Натрієво-калієве скло рідке (до маси сухої шихти)	24 – 28	ТУ 21 – 01 – 478 – 71

Вимоги до стержня і готових електродів:

Діаметр стержня, мм	Довжина електрода, мм	Коефіцієнт маси покриття, %	Група товщини покриття	Допустима масова частка вологи в покритті перед використанням, %
3 4 – 5	350 450	35 – 39	С	≤0.3

Режим зварювання: струм постійний зворотної полярності напруга холостого ходу джерела живлення дуги 65 В, рекомендовані значення струму (А) при $U_{зв}=23\div 26$ В:

Положення шва	Діаметр електрода, мм		
	3	4	5
Нижнє	90 – 100	130 – 150	170 – 190
Горизонтальне, вертикальне	80 – 100	110 – 130	150 – 170
Верхнє	75 – 95	100 – 120	–

Коефіцієнт наплавлення 12 - 14 г/(А год.). Масові витрати електродів на 1 кг наплавленого металу 1.65 кг.

Механічні властивості

Метал шва				Зварне з'єднання
$\bar{\sigma}_m$, МПа	$\bar{\sigma}_B$, МПа	$\bar{\sigma}_5$, %	a_H , Дж/см ³	$\bar{\sigma}_B$, МПа
550	650	16	60	650

Хімічний склад наплавленого металу

C	Mn	Si	Ni	Cr	S	P
					Не більше	
≤0.035	0.15	0.35	1.8 – 2.5	12.0 – 15.0	0.022	0.025

Електрод марки ЦЧ – 3А

Використовується для холодного зварювання пошкоджених деталей і зварювання дефектів у виливках з високостійкого магнієвого чавуну з сфероїдальним графітом, із сірого чавуну з пластинчатим графітом, коли необхідна механічна обробка місць зварювання. Зварювальний дріт марки Св – 08Н50 ГОСТ 2246 – 70. Вид покриття Б.

Склад покриття

Компонент покриття, марка	Масова частка компонента, %	ГОСТ, ТУ
Пісок кварцовий	9	4417 – 75
Доломіт (сірий)	55	–
Плави́кошпатовий концентрат, ФФС – 97А, ФФС – 97Б	15	4421 – 73
Феротитан, Tu0, Tu1	42	ТУ14-5-105-78
Феросиліцій, ФС – 75	5	1415 – 78
Натрієво-калієве скло рідке (до маси сухої шихти)	30 – 32	13079 – 67
Феромарганець, ФМн 78	4	4755 – 80

Вимоги до стержня і готових електродів

Діаметр стержня, мм	Довжина електрода, мм	Коефіцієнт маси покриття, %	Група товщини покриття	Допустима масова частка вологи в покритті перед використанням, %
4	350	20 – 24	С	≤0.3
5	400			
6	450			

Режим зварювання: струм постійний зворотної полярності, напруга холостого ходу джерела живлення дуги 65 В, рекомендовані значення струму (А) при $U_{зв}=20\div 22$ В:

Положення шва	Діаметр електрода, мм		
	3	4	5
Нижнє	110 – 130	140 – 160	170 – 190

Механічні властивості

Контрольований об'єкт	Метал шва			
	σ_m , МПа	σ_B , МПа	σ_5 , %	a_{175} , Дж/см ²
Метал шва	38.0	52.0	7.0	–
Зварне з'єднання з чавуну: високостійкого перлітно-феритного	37.0	44.0	1.1	1.7
сірого	–	14.0	–	–

Хімічний склад наплавленого металу

C	Mn	Si	Ni	S	P
				не більше	
0.8 – 1.3	0.2 – 0.3	3.00 – 3.25	45.0 – 51.0	0.024	0.03

Спеціальні характеристики: зварювання варто виконувати з мінімальним проплавленням зварюваного чавуну, короткими валиками і зі старанним проковуванням кожного з них; валики використовуються довжиною 70 – 100 мм у гарячому стані.

ЛІТЕРАТУРА

1. Фоминых В. П., Яковлев А. П. Электросварка. – М.: Высш. школа, 1976. – 288 с.
2. Сварочные работы. Настольная книга электрогазосварщика. – Киев: Основа, 2001. – 272 с.
3. Сварка, резка, пайка металлов. – М.: Аделант, 2001. – 192 с.
4. Малыш В. М., Сорока М. М. Электрическая сварка. – К.: Техника, 1986. – 111 с.
5. Кабанов Н. С. Сварка на контактных машинах. - М.: Высшая школа, 1985. – 270 с.
6. Ободянский А. В., Золотарёв И. А. Справочное пособие по сварке сталей. – Днепропетровск: 1973. - 220 с.
7. Никифоров Н. И., Нешумова С. П., Антонов И. А. Справочник газосварщика и газорезчика. – М.: Высшая школа, 2002. – 239 с.
8. Биковський О. І., Пінковський І. В. Довідник зварника. – Київ: Техніка, 2002. – 336 с.
9. Геворкян В.Г. Основы сварочного дела: Учебник для строит. спец. техникумов. - 4-е изд. перераб. и доп. - М.: Высшая школа. – 168 с.
10. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением. / Под ред. акад. Б.Е.Патона. М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.
11. Справочник сварщика. / Под ред. В.В.Степанова. - 4-е изд. перераб. и доп. - М.: Машиностроение. 1982. - 560с.
12. Акулов А.И., Бельчук Г.А., Демянцевич В.П. Технология и оборудование сварки плавлением. Учебник для студентов ВУЗов. М.: Машиностроение, 1977. – 432 с., ил.
13. Руге Ю. Техника сварки. Справочник. – М.: Машиностроение 1984. – 550 с.
14. Матеріали з технології та обладнання зварювання, які опубліковано в журналах: “Автоматическая сварка”, “Сварочное производство”, “Сварка”.

Навчальне видання

Савуляк Валерій Іванович,
Андрій Юрійович Осадчук

Ручне електродугове зварювання

Навчальний посібник

Оригінал-макет підготовлено Осадчуком А. Ю.

Редактор В. О. Дружиніна

Коректор В. В. Поліщук

Навчально-методичний відділ ВНТУ
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК №746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ

Підписано до друку

Формат 29.7x42 $\frac{1}{4}$

Друк різнографічний

Тираж прим.

Зам. №

Гарнітура Times New Roman

Папір офсетний

Ум. друк. арк.

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького державного технічного університету
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК №746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ