

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"  
Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова  
Інститут електрозварювання імені С. О. Патона

**І. В. КРІВЦУН, В. В. КВАСНИЦЬКИЙ,  
С. Ю. МАКСИМОВ, Г. В. ЄРМОЛАЄВ**

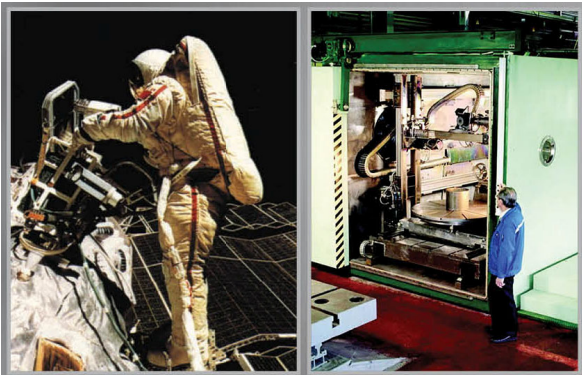
## СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ

Підручник

За загальною редакцією  
академіка НАН України, доктора технічних наук,  
професора **Б. С. ПАТОНА**

*Рекомендовано Вченими радами НТУУ "Київський політехнічний інститут", НУК імені адм. Макарова, Приазовського державного технічного університету, МОН України та Інституту електрозварювання ім. С.О. Патона НАН України*

Електронне видання  
комбінованого використання на DVD-ROM



МИКОЛАЇВ ♦ НУК ♦ 2017

УДК 621.791.052 (075.8)  
ББК 30.616я73

С 71

*Колектив авторів:*

І. В. Кривцун, академік НАН України, доктор технічних наук, професор (Інститут електрозварювання ім. С. О. Патона, м. Київ); В. В. Квасницький, доктор технічних наук, професор (Національний технічний університет "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ); С. Ю. Максимов, доктор технічних наук, старший науковий співробітник (Інститут електрозварювання ім. С. О. Патона, м. Київ); Г. В. Єрмолаєв, кандидат технічних наук, доцент (Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, м. Миколаїв)

*Рецензенти:* В. В. Дмитрик, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри зварювання Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"; Н. О. Макаренко, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри обладнання і технології зварювального виробництва Донбаської державної машинобудівної академії; В. В. Чигаров, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри "Металургія і технології зварювального виробництва" Приазовського державного технічного університету

*Рекомендовано Вченими радами НТУУ "Київський політехнічний інститут" (протокол № 11 від 07.11.2016 р.), НУК імені адм. Макарова (протокол № 8 від 25.09.2015 р.), Приазовського державного технічного університету (протокол № 9 від 28.01.2016 р.), МОН України та Інституту електрозварювання ім. С.О. Патона (протокол № 3 від 12.10.2016 р.) НАН України як підручник для студентів, які навчаються за спеціальністю "Прикладна механіка"*

Електронний аналог друкованого видання:

**Спеціальні способи зварювання** : підручник / І. В. Кривцун, В. В. Квасницький, С. Ю. Максимов, Г. В. Єрмолаєв, за загальною редакцією академіка НАН України, доктора технічних наук, професора Б. С. Патона. – Миколаїв : НУК, 2017. – 346 с.

ISBN 978–966–321–321–7

Викадено спеціальні способи зварювання у твердому стані, плавленням із використанням висококонцентрованих джерел енергії та гібридні технології, зварювання і споріднені технології під водою, в космосі й медицині. Широко використано досвід і розробки авторів та сучасні досягнення наукових організацій і підприємств.

Призначено для студентів технічних університетів, що вивчають зварювання та споріднені процеси і технології, а також може бути корисним магістрантам, дипломникам, аспірантам, інженерно-технічним працівникам машинобудування та інших галузей.

УДК 621.791.052 (075.8)  
ББК 30.616я73

Навчальне видання

**КРІВЦУН** Ігор Віталійович  
**КВАСНИЦЬКИЙ** Віктор Вячеславович  
**МАКСИМОВ** Сергій Юрійович  
**ЄРМОЛАЄВ** Геннадій Володимирович

## СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ

Підручник

За загальною редакцією  
академіка НАН України, доктора технічних наук,  
професора **Б. С. ПАТОНА**

Редактор **О. Ю. Банкулова**  
Комп'ютерне складання та верстання **А. Д. Літвінова**  
Коректор **М. О. Паненко**

© Колектив авторів, 2017

© Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова, 2017

ISBN 978–966–321–321–7

Формат 70x100/16. Ум. друк. арк. 28.1. Об'єм даних 28047 кб.  
Тираж 50 прим. Вид. № 15. Зам. № 5.

Видавець і виготовитель Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова  
просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025  
E-mail : publishing@nuos.edu.ua

Свідцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2506 від 25.05.2006 р.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	6
1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ З ВИСОКО-ІНТЕНСИВНОЮ СИЛОВОЮ ДІЄЮ .....	9
1.1. Суть, класифікація та особливості спеціальних способів зварювання тиском .....	9
1.1.1. Суть зварювання тиском .....	9
1.1.2. Класифікація спеціальних способів зварювання тиском .....	11
1.1.3. Особливості спеціальних способів зварювання тиском .....	15
1.2. Холодне зварювання .....	19
1.2.1. Суть способу .....	19
1.2.2. Технологія зварювання .....	26
1.2.3. Зварювальне устаткування .....	31
1.2.4. Особливості та сфери застосування холодного зварювання ...	33
1.3. Ультразвукове зварювання .....	35
1.3.1. Суть способу .....	35
1.3.2. Технологія зварювання .....	40
1.3.3. Зварювальне устаткування .....	45
1.3.4. Особливості та сфери застосування ультразвукового зварювання .....	52
1.4. Зварювання тертям .....	53
1.4.1. Суть способу .....	53
1.4.2. Технологія зварювання .....	59
1.4.3. Зварювання тертям з перемішуванням .....	69
1.4.4. Зварювальне устаткування .....	72
1.4.5. Особливості та сфери застосування зварювання тертям ...	76
1.5. Високочастотне зварювання .....	78
1.5.1. Суть способу .....	78
1.5.2. Технологія зварювання .....	84
1.5.3. Зварювальне устаткування .....	89
1.5.4. Особливості та сфери застосування високочастотного зварювання .....	93
1.6. Зварювання вибухом .....	95
1.6.1. Суть способу .....	95

1.6.2. Технологія зварювання .....	98
1.6.3. Устаткування, особливості та сфери застосування зварювання вибухом .....	102
1.7. Магнітно-імпульсне зварювання .....	105
1.7.1. Суть способу і технологія зварювання .....	105
1.7.2. Особливості та сфери застосування магнітно-імпульсного зварювання .....	107
<i>Контрольні питання і завдання</i> .....	109
2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ З НИЗЬКОІНТЕНСИВНОЮ СИЛОВОЮ ДІЄЮ .....	111
2.1. Дифузійне зварювання у вакуумі .....	111
2.1.1. Суть способу .....	111
2.1.2. Технологія дифузійного зварювання у вакуумі за традиційною схемою .....	134
2.1.3. Технологія дифузійного зварювання у вакуумі з керованим напружено-деформованим станом .....	144
2.1.4. Зварювальне устаткування .....	170
2.1.5. Особливості та сфери застосування дифузійного зварювання у вакуумі .....	181
2.2. Зварювання прокатуванням .....	183
2.3. Інші способи зварювання тиском .....	187
<i>Контрольні питання і завдання</i> .....	192
3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ ВИСОКОЦЕНТРОВАНИМИ ДжЕРЕЛАМИ ТЕПЛА .....	194
3.1. Електронно-променеве зварювання .....	195
3.1.1. Суть способу .....	195
3.1.2. Технологія зварювання .....	198
3.1.3. Зварювальне устаткування .....	215
3.1.4. Особливості та сфери застосування електронно-променевого зварювання .....	221
3.2. Лазерне зварювання та різання .....	225
3.2.1. Властивості та генерація лазерного променя .....	225
3.2.2. Технологія лазерного зварювання .....	233
3.2.3. Технологія лазерного різання .....	246
3.2.4. Лазерне устаткування .....	252
3.2.5. Особливості та сфери застосування лазерної обробки матеріалів .....	256
3.3. Плазмове зварювання і різання матеріалів .....	257
3.3.1. Властивості плазмового потоку .....	257
3.3.2. Технологія плазмового зварювання .....	261
3.3.3. Технологія плазмового різання .....	270
3.3.4. Устаткування для плазмової обробки матеріалів .....	274
3.3.5. Особливості та сфери застосування плазмової обробки матеріалів .....	277
3.4. Гібридні технології зварювання і споріднених процесів .....	278
3.4.1. Гібридні лазерно-дугові процеси .....	278

3.4.2. Особливості гібридних технологій лазерно-дугового зварювання і споріднених процесів .....	284
3.4.3. Плазмодугове зварювання алюмінію та його сплавів ....	291
<i>Контрольні питання і завдання</i> .....	293
<b>4. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ І СПОРІДНЕНІ ПРОЦЕСИ ПІД ВОДОЮ, В КОСМОСІ ТА В МЕДИЦИНІ .....</b>	<b>294</b>
4.1. Способи зварювання і різання під водою .....	294
4.1.1. Суть способу підводного дугового зварювання .....	294
4.1.2. Особливості металургійних процесів при мокрому зварюванні і формування структури металу зварних з'єднань .....	298
4.1.3. Зварювальні матеріали .....	303
4.1.4. Термічне підводне різання .....	306
4.1.5. Обладнання для зварювання і різання та їх застосування .....	308
4.2. Зварювання та споріднені технології в космосі .....	311
4.2.1. Особливості космічного середовища .....	311
4.2.2. Аналіз способів зварювання щодо можливості їх використання в космосі .....	314
4.2.3. Електронно-променево обладнання та його використання в космічних умовах .....	316
4.3. Зварювання та споріднені процеси в медицині .....	319
4.3.1. Високочастотне зварювання живих тканин .....	320
4.3.2. Гіпертермічні способи зварювання, різання і обробки живих тканин .....	328
4.3.3. Покриття для стентів, імплантанти, протези, хірургічний інструмент, біокерамічні покриття та композиційні матеріали для медицини .....	330
4.3.4. Застосування паро-плазмової технології для переробки медичних відходів .....	336
<i>Контрольні питання і завдання</i> .....	338
<b>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ .....</b>	<b>339</b>

---

---

## ВСТУП

Зварювання є одним з провідних технологічних процесів у багатьох галузях промисловості, нової техніки тощо. Ефективність машин, енергетичних установок, космічної та підводної техніки визначають конструкційні матеріали. Вони постійно вдосконалюються в напрямку підвищення їх експлуатаційних властивостей і працездатності. Створюються нові високоміцні сплави, композиційні та неметалічні матеріали, що застосовуються як в однорідних, так і різнорідних з'єднаннях при виготовленні деталей, вузлів та великогабаритних конструкцій. Успішне використання цих матеріалів забезпечується розробкою спеціальних способів зварювання.

Застосування нових конструкційних матеріалів та спеціальних способів їх зварювання дозволило суттєво підвищити ефективність і ресурс роботи багатьох конструкцій. Наприклад, ефективність енергетичних установок знаходиться в прямій залежності від параметрів робочого тіла. Розрахунки та експлуатація газотурбінних двигунів і установок показали, що підвищення температури газу перед турбіною від 820 до 1050 °С дозволяє подвоїти потужність та підвищити економічність без зміни її габаритів. Підвищення температури газу забезпечує використання високожароміцних дисперсійно твердіючих нікелевих сплавів, дисперсно-зміцнених композиційних та неметалічних матеріалів, нових охолоджуваних конструкцій деталей гарячого тракту та спеціальних способів зварювання, оскільки найбільш відомі і поширені способи електродугового та контактного зварювання для вказаних матеріалів є непридатними.

При виготовленні ракетно-космічної та інших видів нової техніки широко використовують тугоплавкі і хімічно активні метали та їх сплави, які мають високу спорідненість до кисню, азоту, водню і чутливість до перегріву при зварюванні, що сприяє окрихчуванню металу. Тому в цих

випадках, як і в енергомашинобудуванні, приладобудуванні, радіоелектроніці, інструментальному виробництві тощо, необхідні прецизійні способи зварювання з обмеженою температурою нагрівання та високою концентрацією тепла.

Головними недоліками електродугового зварювання є розплавлення металу, відносно невелика концентрація енергії, недосконалість захисту металу від взаємодії з киснем, азотом і воднем. Тривала дія високих температур при недосконалому захисті металу призводить до втрати ним важливих властивостей (пластичності, міцності, стійкості зварних з'єднань проти тріщин, корозії, переходу до крихкого стану). Значні розміри зварного шва і зони термічного впливу (ЗТВ) призводять до суттєвих витрат електричної енергії та деформування зварних конструкцій. Тому розвиток спеціальних способів зварювання було спрямовано на розробку способів зварювання у твердому стані, використання джерел тепла з високою концентрацією енергії (плазма, електронний і лазерний промені), вдосконалення захисту металу при зварюванні як у твердому стані, так і плавленням, у вакуумі, розробку гібридних технологій.

Спеціальні способи зварювання змінили уявлення про здатність матеріалів до зварювання: багато з них перейшли з розряду тих, що погано зварюються, до таких, які широко застосовуються в зварних конструкціях.

Слід відзначити, що теплові джерела з високою концентрацією енергії застосовуються не лише для зварювання, але і для споріднених процесів. Наприклад, у суднокорпусобудуванні, де термічне різання складає 10...20% від загального обсягу робіт виготовлення деталей корпусу судна за трудомісткістю, використовують плазмове різання, яке замінило газокисневе. У промисловості лазер застосовується також для різання. Ефективним є виконання за допомогою електронного променя і плазми напилювання покриття.

Широкі можливості підвищення ефективності зварювання плавленням відкриває розробка гібридних технологій, зокрема лазерно-дугових та лазерно-плазмових.

Зварювання і споріднені технології все більш широко застосовуються під водою, в космосі та медицині. Вони розглядаються в даному підручнику.

Розвиток та використання багатьох спеціальних способів зварювання і споріднених технологій відбувалися завдяки роботам українських вчених. Провідна роль у розвитку спеціальних способів зварювання належить Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України.

Підручник "Спеціальні способи зварювання" складено відповідно до програми однойменного курсу для студентів технічних університетів

## ВСТУП

---

---

України, що навчаються за напрямом "Зварювання", та з урахуванням багаторічного науково-педагогічного досвіду авторів підручника у розробці та впровадженні спеціальних способів зварювання, а також виданих раніше навчальних посібників [6, 19, 21, 23, 29, 42, 58], довідників [52, 70], монографій та наукових періодичних видань.

Підручник підготували:

**Кривцун І. В.** – розд. 3, п.п. 3.2 і 3.4; розд. 4, п.п. 4.2 і 4.3.

**Квасницький В. В.** – вступ; розд. 1; розд. 2 крім п.п. 2.1.1 і 2.1.2; розд. 3, п. 3.1.

**Максимов С. Ю.** – розд. 3, п.п. 3.3; розд. 4, п. 4.1.

**Єрмолаєв Г. В.** – розд. 2, п.п. 2.1.1 і 2.1.2.

Підручник видається частково за кошти авторів.

---

---

# 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ З ВИСОКОІНТЕНСИВНОЮ СИЛОВОЮ ДІЄЮ

## 1.1. Суть, класифікація та особливості спеціальних способів зварювання тиском

### 1.1.1. Суть зварювання тиском

Суть зварювання тиском полягає в утворенні на електронному рівні зв'язків між атомами з'єднаних поверхонь без їх розплавлення за рахунок пластичної деформації металу. Зварювання виконується як без підігріву, так і з підігрівом, який сприяє розвитку пластичної деформації при меншому тиску та об'ємних процесів у зоні стику.

Технічна поверхня твердих металів і сплавів може бути отримана різними способами обробки. Вона характеризується двома факторами: геометричним або рельєфом і фізичним станом. У машинобудуванні прийнято рельєф поверхні визначати хвилястістю і шорсткістю. Хвилястість характеризує геометрію поверхні в макроскопічному, а шорсткість – у мікроскопічному масштабах. Шорсткість поверхні характеризується висотою мікронерівностей, яка може бути при чистовій токарній обробці 10 мкм, шліфуванні – 6,3 мкм, поліруванні – 0,4 мкм. Величина мікронерівностей залежить як від матеріалу, інструменту, так і режимів обробки. Профілограми поверхонь алюмінієвої і сталеві деталей після їх обробки точінням (I) і після притиснення до плити Йогансона (II) показано на рис. 1.1.

Користуючись профілограмами розраховують значення  $R_a$  і  $R_z$  та визначають клас чистоти обробки поверхні.



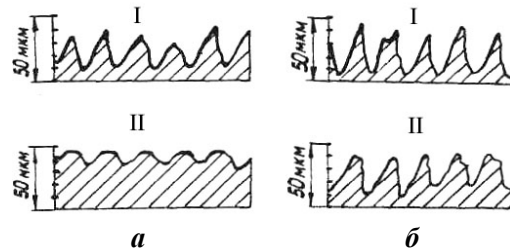


Рис. 1.1. Профілограми поверхонь алюмінієвої (а) і сталеві (б) деталей

Виділяючи макро- і мікрометрію поверхні, її можна зобразити у вигляді двох ліній: лінії макрогеометрії типу хвилі і частотної лінії шорсткості, яка накладається на першу (рис. 1.2). Макрогеометрія поверхні по перерізу може моделюватися у вигляді сферичних (еліпсоїдальних) (див. рис. 1.2,а), конусних (б), хвилястих (в) та інших виступів залежно від способу обробки деталі.

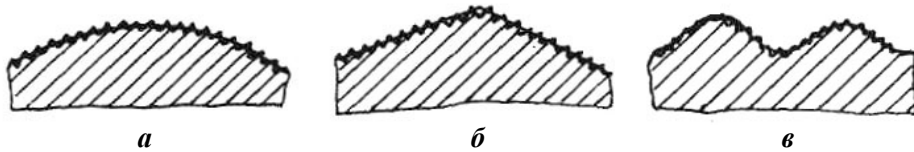


Рис. 1.2. Схема хвилястих і шорсткуватих поверхонь

Фізичний стан поверхонь твердих тіл характеризується наявністю на них різних забруднень. Ідеально чиста (ювенільна) поверхня металу, вільна від оксидних плівок, адсорбованих газів тощо, може бути утворена тільки в особливих умовах, наприклад у глибокому вакуумі ( $10^{-6} \dots 10^{-7}$  Па). Реальна поверхня металу має різні забруднення. Безпосередньо до металеві поверхні прилягає оксидна плівка, що зберігає на межі з металом негативний потенціал. Її товщина залежить від умов окиснення. Наприклад, на вуглецевих і нержавіючих хромонікелевих сталях при витримці їх протягом декількох днів при кімнатній температурі на повітрі товщина оксидної плівки складає  $25 \dots 30 \text{ \AA}$  ( $2 \dots 3 \text{ нм}$ ).

Нерівності поверхонь і наявні на них оксидні плівки перешкоджають утворенню міжатомних зв'язків при зварюванні у твердому стані. На якість зварювання також впливають адсорбовані забруднення, особливо хемосорбований кисень. При атмосферному тиску мономолекулярний шар газу на поверхні металу утворюється через  $2,4 \cdot 10^{-9}$  с, тобто миттєво після очистки інструментом. У вакуумі  $10^{-6}$  Па це відбувається через 180 с, а  $10^{-7}$  Па – через 1800 с.

Мікронерівності, оксидні плівки та адсорбовані гази, волога, органічні плівки легко усуваються при розплавленні крайок з'єднаних металів, а з'єднання формується спонтанно при кристалізації розплавленого металу шва. При зварюванні у твердому стані зближення з'єднаних поверхонь на міжатомні відстані (**утворення фізичного контакту**) забезпечується пластичною деформацією металу в зоні стику під дією певних зусиль, що поєднує різні способи зварювання в групу способів **зварювання тиском**.

Для утворення зв'язків безпосередньо між поверхневими атомами необхідно забезпечити видалення оксидів та хемосорбованого кисню. Утворення вільних зв'язків у поверхневих атомів називають **активацією** поверхні. Для активації поверхні використовують різні механізми. Наприклад, при холодному зварюванні, яке зазвичай виконується без підігріву з великими пластичними деформаціями (55...90 %), оксидні плівки та інші забруднення руйнуються і виносяться зі стику разом з витісненим металом. Аналогічно видаляються забруднення і при інших способах зварювання з інтенсивною пластичною деформацією (зварювання тертям, вибухом тощо). Важливу роль відіграють також термічна, хімічна та інші способи активації.

У полікристалічному металі за рахунок хімічної і фізичної мікронеоднорідностей міжатомні зв'язки на границі зерен слабші, ніж у тілі зерна. Оскільки в стику з'єднуються зерна, орієнтація кристалічних ґраток яких рідко збігається, то при зварюванні необхідно забезпечити умови утворення в зоні стику спільних зерен для обох деталей (утворення міжатомних внутрішньокристалічних зв'язків), а також хімічної однорідності при зварюванні однойменних металів. Ці умови пов'язані з пластичною деформацією металу та температурою, що визначають процеси рекристалізації і дифузії (**процеси об'ємної взаємодії**).

Дефекти кристалічної ґратки металів, будова поверхні, способи її активації, процеси взаємодії поверхонь при з'єднанні, дифузія тощо детально розглядаються у ході вивчення дисципліни "Поверхневі фізико-хімічні процеси", яка є теоретичною основою технологій зварювання у твердому стані, паяння матеріалів, нанесення покриття, які виконуються при температурах, нижчих від температури плавлення основного металу.

### ***1.1.2. Класифікація спеціальних способів зварювання тиском***

Утворення з'єднання при будь-якому способі зварювання у твердому стані обумовлене деформаційною або термодформаційною дією на з'єднувані матеріали в зоні стику, але вони відрізняються за кінетикою

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

перебігу процесів, що визначається умовами деформації (температура, характер дії навантаження та напружено-деформованого стану (НДС)), інтенсивністю і ступенем локалізації деформації та іншими факторами, за якими можна класифікувати спеціальні способи зварювання.

Залежно від термічних умов деформування розрізняють способи зварювання з **підігрівом** та **без підігріву**. При кімнатній температурі виконується лише холодне зварювання. Решта спеціальних способів зварювання здійснюється з підігрівом. Температура підігріву при різних способах зварювання не є однаковою. При деяких способах вона не контролюється або не може контролюватися, наприклад при зварюванні вибухом, тертям, але забезпечує пластичний стан металу і є важливим фактором впливу на механізм пластичної деформації та формування з'єднань.

За механізмом пластичної деформації розрізняють способи зварювання, при яких деформація відбувається при тиску, що перевищує границю плинності ( $p > \sigma_p$ ), та в умовах, коли тиск менший від границі плинності металу ( $p < \sigma_p$ ). У першому випадку деформація не залежить від часу, а визначається лише швидкістю дії деформаційного пристрою. Академік НАН України В.І. Махненко назвав таку деформацію **миттєвою** [51]. У другому випадку деформація відбувається за рахунок **повзучості** металу і залежить від часу дії тиску. При деформації повзучості час зварювання також є важливим параметром режиму зварювання. Якщо холодне зварювання виконується лише з миттєвою деформацією, то зварювання з підігрівом здійснюється як з миттєвою деформацією (пресове, тертям тощо), так і з деформацією повзучості (дифузійне зварювання). Додатковими факторами є захисне середовище ( $A$ ), умови активації поверхні, інтенсифікації процесів тощо ( $f$ ).

Класифікацію способів зварювання тиском за основними і додатковими факторами впливу запропоновано в ряді робіт. У роботі [6] виділено групи способів, які віднесено до  $p$ -,  $p, T$ -,  $p, T, t$ -,  $p, T, t, A$ -,  $p, T, f$ -процесів. До  $p$ -процесів віднесено холодне зварювання, до  $p, T$ -процесів – пресове, вибухом, до  $p, T, A$ -процесів – газопресове, до  $p, T, t, A$ -процесів – дифузійне, до  $p, T, f$  – тертям і ультразвукове. Значення теплового  $T$ , силового  $p$  і часового  $t$  факторів для деяких спеціальних способів зварювання у твердому стані показано на рис. 1.3.

Для порівняння на рис. 1.3 показано параметри для стикового контактного зварювання електричним опором з оплавленням крайок.

Автори роботи [29] пропонують дещо інший розподіл способів зварювання. Наприклад, ультразвукове зварювання і зварювання тертям вони відносять до  $p, f$ -процесів, ударне зварювання у вакуумі – до  $p, T$ -

## 1. 1. Суть, класифікація та особливості спеціальних способів зварювання тиском

процесів, дифузійне – до  $p, T, t, A, f$ -процесів. У зарубіжній літературі дифузійне зварювання з проміжними прошарками, що розплавляються і витискуються зі стику при зварюванні, відоме як  $T, L, P$ -процес, тобто основними факторами є температура ( $T$ ), тиск ( $P$ ) і наявність розплаву ( $L$ ). При вдосконаленні відомих способів зварювання можуть діяти також інші фактори. Тому наведена класифікація умовна і не є вичерпною.

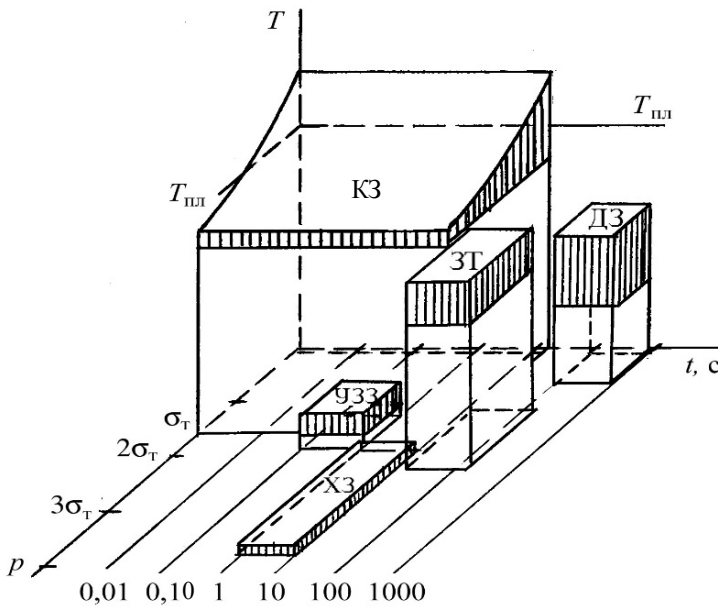


Рис. 1.3. Діаграма середніх значень температури, тиску і часу при різних способах зварювання:

КЗ – стикове контактне; ДЗ – дифузійне; УЗЗ – ультразвукове; ЗТ – тертям;  
ХЗ – холодне ( $T_{пл}$  – температура плавлення)

Складні процеси утворення з'єднань у твердому стані обумовили різні трактування самого зварювання і його стадій при різних способах, але позиції різних авторів не є взаємовиключними, а підкреслюють роль тих або інших сторін комплексного процесу. Сьогодні одностайно визнано виділення трьох основних стадій в узагальненому процесі зварювання. Вони впливають із необхідності забезпечення такої будови зварного з'єднання однойменних матеріалів, яка б відповідала будові основного матеріалу на будь-якому рівні структури: **електронної, кристалічної, атомної, мікро- та макроструктури**. Для цього необхідне зближення поверхонь деталей на міжатомні відстані (**утворення фізичного контакту**), утворення зв'язків безпосередньо між атомами з'єднуваних

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

металів (активація поверхонь) та фізична, хімічна і структурна однорідність. При зварюванні різнойменних матеріалів структура повинна забезпечити необхідні властивості з'єднань. Вони, як правило, визначаються структурою матеріалів у зоні стику.

*Утворення фізичного контакту досягається шляхом пластичної деформації металу в зоні з'єднання при різних механізмах деформації, які залежать від температури та інтенсивності силового впливу. Вище відзначалися **активна деформація та повзучість** під дією зовнішніх сил, але вони не вичерпують усіх можливостей. Наприклад, при з'єднанні матеріалів із використанням ультрадисперсних порошків, як і в технологіях порошкової металургії, важливу роль відіграє поверхнева енергія високодисперсної системи, зближенню ковару зі склом сприяють внутрішні електростатичні сили стискування в електричному полі.*

*Основними механізмами активації поверхні є термічний (дисоціація і сублімація оксидів, розчинення оксидів і кисню основним металом), деформаційний, хімічний (відновлення металу та перетворення оксидів у леткі з'єднання), розчинення адсорбованих плівок із видаленням зі стику. Цей перелік також не є вичерпним. Наприклад, при з'єднанні кремнію, ковару зі склом (електрохімічне зварювання) активація атомів кисню досягається під дією постійної електричної напруги.*

***Об'ємна взаємодія при зварюванні тиском включає у себе процеси дифузії, повернення (відпочинок, полігонізація), рекристалізації (первинна, збірна, вторинна).***

Не для всіх способів зварювання тиском характерні перелічені процеси. Цей перелік не визначає також послідовності перебігу процесів, наприклад, можлива спочатку термічна або хімічна активація поверхонь, потім утворення фізичного контакту. Не для всіх матеріалів зазначені процеси при з'єднанні відіграють позитивну роль. Наприклад, дисоціація може викликати деструкцію матеріалу, дифузія – призвести до утворення крихких прошарків або пористості, рекристалізація – до знеміцнення або окрихчування тощо. Тому необхідно враховувати можливість проходження тих чи інших процесів при конкретних способах зварювання, їх вплив на властивості основного матеріалу і з'єднань, контролювати та залежно від впливу розвивати або обмежувати їх перебіг.

Будь-які процеси зварювання тиском супроводжуються дією всіх або частини відзначених вище основних і додаткових факторів: тиск  $p$  (деформація), температура  $T$ , час  $t$ , середовище  $A$ , спосіб активації поверхні  $f$  тощо. Іноді окремі параметри настільки тісно пов'язані, що не можуть самостійно контролюватися.

Розглядаючи конкретні способи зварювання, можна більш чітко виділити роль того чи іншого процесу. Наприклад, при холодному зварю-

ванні головну роль відіграє активна деформація металу, що забезпечує видалення оксидних плівок, фізичний контакт та активацію поверхонь. Роль термічної активації та об'ємної взаємодії неістотна, про що свідчать результати холодного зварювання алюмінію при температурах до  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

При  $p, T$ -процесах істотну роль відіграє термічна активація. Об'ємна взаємодія здебільшого незначна. При збільшенні часу в  $p, T, t$ -процесах вплив взаємодії матеріалів різко зростає.

Необхідною умовою всіх способів зварювання тиском є пластична деформація. З деформацією пов'язані не лише процеси утворення фізичного контакту, очищення з'єднаних поверхонь та їх активації, утворення активних центрів, але також процеси об'ємної взаємодії. Тому величина та швидкість деформації визначають формування зварного з'єднання в цілому. За інтенсивністю силової дії способи зварювання тиском умовно поділяють на три групи [45].

До першої групи відносять способи з низькоінтенсивною силовою дією, що виконуються з низькою швидкістю деформації ( $10^{-6} \dots 10^{-4}\text{ c}^{-1}$ ) за рахунок повзучості. Яскравим прикладом може бути дифузійне зварювання у вакуумі (ДЗВ) за традиційною схемою.

До другої групи відносять способи із середньоінтенсивною силовою дією і середньою швидкістю деформації ( $10^{-3} \dots 10^{-1}\text{ c}^{-1}$ ). Група включає в себе холодне зварювання (ХЗ), зварювання тертям (ЗТ), зварювання прокатуванням (ЗПр) та інші способи з вимушеною активною деформацією.

До третьої групи відносять способи з високоінтенсивною силовою дією і високою швидкістю деформації ( $10 \dots 10^5\text{ c}^{-1}$ ), зокрема магнітоімпульсне зварювання (МІЗ), ударне зварювання у вакуумі (УЗВ), зварювання вибухом (ЗВ).

### ***1.1.3. Особливості спеціальних способів зварювання тиском***

При зварюванні тиском пластична деформація повинна бути локалізована у зоні стику для запобігання деформації всієї деталі та активації поверхонь з'єднання. У роботах Л.І. Маркашової, В.В. Арсенюка, Г.М. Григоренка відзначається, що при зварюванні у твердому стані ступінь локалізації пластичної деформації залежить від інтенсивності силової дії. Тому формування зварного з'єднання при різних способах зварювання має свої особливості [45]. Установлено, що при збільшенні швидкості деформації ступінь локалізації та глибина зони деформації зростають. При ЗВ має місце значне зростання деформації зсуву. Разом зі збільшенням швидкості деформації змінюються механізми формування структури та масопереносу в зоні зварювання [45, 67].

При низькошвидкісній деформації (наприклад, при традиційній схемі ДЗВ) спостерігаються хаотичний розподіл дислокацій, клубково-комірчаста

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

та субзеренна структури. З підвищенням швидкості деформації (наприклад, при МІЗ) існують повороти елементів структури у вигляді фрагментації і двійникування зерен, чітка орієнтація структур у напрямку діючих напружень та повороти фрагментів субзеренних і зеренних розмірів. При швидкостях деформації  $10^4 \dots 10^5 \text{ c}^{-1}$  (наприклад, при ЗВ) механізми деформації зв'язані з потужними колективними формами руху дефектів кристалічної будови, при яких метал переходить в особливий аморфно-кристалічний стан.

Типи структур при різних швидкостях деформації вивчено в ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Встановлено, що в процесі високотемпературної деформації разом зі збільшенням швидкості деформації (при переході від ДЗВ до ЗВ) у зоні зварювання відбувається формування структури в такій послідовності: дислокаційні плоскі скупчення та хаотичний розподіл дислокацій; клубкові, блочні, комірчасті, субзеренні структури; фрагменти; двійники; смугасті структури різних типів (смуги зсуву та переорієнтації). Типи деяких із них показано на рис. 1.4 [45].

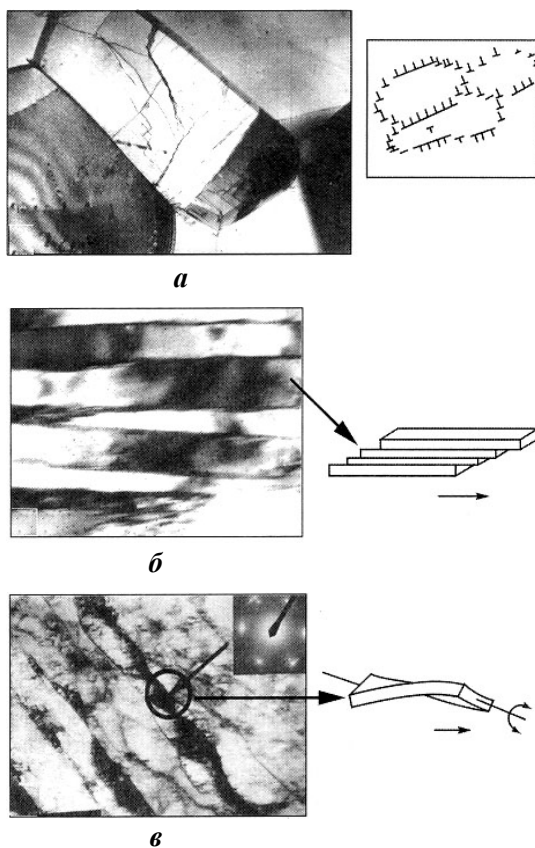


Рис. 1.4. Типи структур ( $\times 30000$ ) у зоні локалізованої деформації при різних швидкостях зовнішнього навантаження та їх схеми:

*a* – комірчасто-субзеренна структура сплаву ХН77ТіО при ДЗВ;  
*б* – смуги зсуву в нікелі при ЗВ;  
*в* – повороти та смуги переорієнтації в нікелі

## 1. 1. Суть, класифікація та особливості спеціальних способів зварювання тиском

Зміну частки різних типів структур при зростанні швидкості деформації показано на рис. 1.5,*а* для металів, однорідних за складом та з високими значеннями енергії дефектів кристалічних ґраток (алюміній АД-1, нікель та його сплави), на рис. 1.5,*б* для металів з фазовими виділеннями, а також із більш низькими значеннями енергії дефектів кристалічних ґраток (зміцнений алюміній, мідь, нержавіюча сталь) [45].

У роботі [67] досліджено механізм масопереносу залежно від швидкості деформації. В умовах низьких швидкостей деформацій, характерних для традиційної схеми ДЗВ, дифузія реалізується за рахунок точкових та лінійних дефектів кристалічної будови, а також уздовж субзеренних та міжзеренних границь. Зі зростанням величини пластичної деформації швидкість дифузії збільшується, чим пояснюється вплив механічної обробки з'єднаних поверхонь на дифузійну рухомість атомів у приконтактних зонах певної глибини. Зі збільшенням швидкості деформації (відповідно миттєвої концентрації дефектів) дифузія зростає. Цей ефект більш сильно виявляється при низьких температурах.

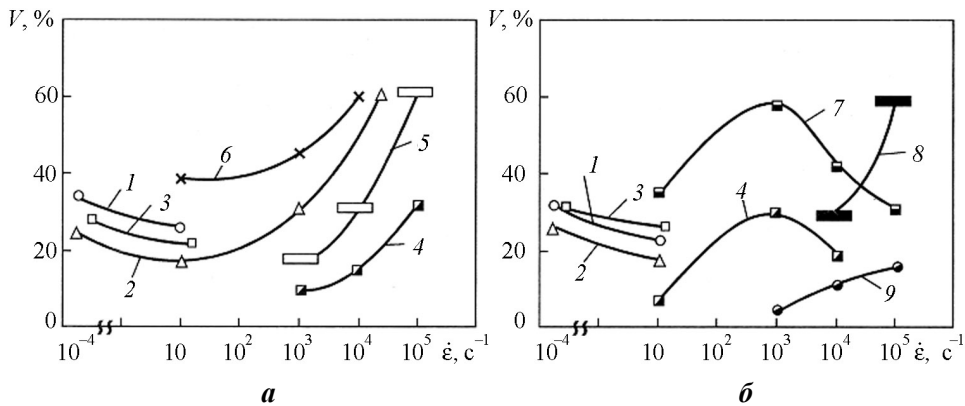


Рис. 1.5. Вплив швидкості деформації  $\dot{\epsilon}$  на об'ємну частку  $V$  різних типів структур у зоні з'єднання при зварюванні тиском:

- 1 – хаотичне розподілення дислокацій; 2 – структури клубково-комірчасті;
- 3 – субзеренні структури, 4 – фрагментові структури; 5 – смуги зсуву;
- 6 – колективні форми руху дефектів кристалічної будови; 7 – двійникування;
- 8 – смуги переорієнтації; 9 – поворот зерен і декількох зерен

В умовах високоінтенсивної силової дії змінюються механізми як пластичної деформації, так і масопереносу. Разом із дислокаційним механізмом спостерігаються колективні форми руху дефектів кристалічних ґраток, переміщення потоків мас одного металу в інший, скупчень сегрегацій, окремих часток різних розмірів (порядку декількох десятків нанометрів) та їх комплексів у напрямку дії зовнішніх напружень, ротаційні



## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

механізми масопереносу, а також утворення кластерного типу (групи з певною кількістю атомів, в об'ємах яких існує кристалічна упаковка, а перехід від одного кластера до іншого здійснюється через більш розупорядковані перехідні області). Зміну механізмів масопереносу від дислокаційного до механічного для різних способів зварювання показано на рис. 1.6 [67].

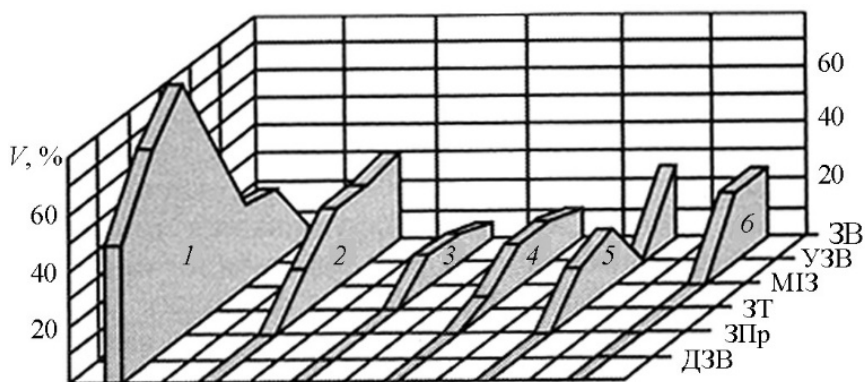


Рис. 1.6. Діаграма зміни об'ємної частки  $V$  механізмів масопереносу при зварюванні різномірних металів:

1 – дислокаційний механізм; 2 – колективна форма руху дефектів кристалічної ґратки; 3 – повороти об'ємів; 4 – ультрадисперсний масоперенос; 5 – переміщення мас; 6 – великі частки

На рис. 1.6 показано роль того чи іншого механізму масопереносу при різних способах зварювання залежно від швидкості деформації. Наприклад, при дифузійному зварюванні у вакуумі за традиційною схемою та зварюванні прокатуванням діє лише дислокаційний механізм. Об'ємна частка цього механізму дуже низька тільки при зварюванні вибухом. Процеси механічного масопереносу діють при зварюванні тертям, магнітно-імпульсному, ударному та зварюванні вибухом.

Слід відзначити, що об'ємні частки різних типів структур і механізмів масопереносу залежать також від НДС і його компонентів у зоні стику. Наприклад, на рис. 1.5 і 1.6 наведено результати для ДЗВ за традиційною схемою зварювання при постійних температурі і тиску. У роботах В.І. Махненка, В.В. Квасницького, Г.В. Єрмолаєва [48, 50] показано, що при дифузійному зварюванні різномірних матеріалів з термоцикуванням у зоні стику пластичні деформації локалізуються та розвиваються деформації зсуву з максимумом в площині стику. Рівень еквівалентних напружень визначається відмінністю температурних коефіцієнтів лінійного розширення (ТКЛР), температурним інтервалом теплостійкості та об'ємними

змiнами при структурних перетвореннях, якщо вони вiдбуваються в температурному iнтервалi теплосмiн. Навiть при ДЗВ однойменних жаромiцних сплавiв у рiзному структурному станi можуть формуватися з'єднання, що мають смуги зсуву та переорiєнтацiї зерен. Такi структури буде показано при вивченнi ДЗВ. Рiвень еквiвалентних напружень у таких з'єднаннях може до двох разiв i бiльше перевищувати номiнальнi напруження стиску та досягати границi плинностi металу. Ще однiєю особливiстю ДЗВ рiзнорiдних матерiалiв є нерiвномiрний розподiл напружень i пластичних деформацiй по площi стику.

Доцiльно пiдкреслити, що дiаграма, яку зображено на рис. 1.6, не охоплює рiзновиди конкретних способiв зварювання i НДС у зонi стику може суттєво впливати на формування з'єднань. Крім того, iснує взаємозв'язок процесiв, що проходять при зварюваннi. Тому видiлення окремих стадiй та груп способiв зварювання є умовним, але воно дозволяє краще зрозумiти суть та керувати напружено-деформованим станом i складними термодформацiйними процесами при зварюваннi у твердому станi (зварюваннi тиском).

## 1.2. Холодне зварювання

### 1.2.1. Суть способу

*Холодне зварювання (kaltpressschweissen; cold welding; холодная сварка)* – це зварювання тиском при великій пластичній деформації без зовнішнього нагрівання деталей, які з'єднуються. Холодне зварювання (ХЗ) здійснюється шляхом спільного пластичного деформування з'єднуваних металів, у результаті чого між ними встановлюється міжатомний зв'язок. Зближення поверхонь на міжатомні відстані та їх активація забезпечуються значними пластичними деформаціями, що складають 55...90%. Тому ХЗ з'єднують метали, які мають високу пластичність при нормальній температурі, наприклад алюміній, мідь.

Основними типами з'єднань є напусткові та стикові. Стрижні, смуги, профілі або дроти 2 зварюють шляхом їх стискування один з одним, устанавлюючи певний виліт із затискачів 1 зварювальної установки (рис. 1.7,а). Застосовують також таврові з'єднання при складанні шинопроводів. При цьому одна деталь є пластиною, а друга – прутком, стрижнем тощо.

Листи товщиною до 15 мм зварюють унапусток шляхом втиснення пуансонів 2 у деталі, які з'єднуються, з однієї або з двох сторін (див. рис. 1.7,б,в).

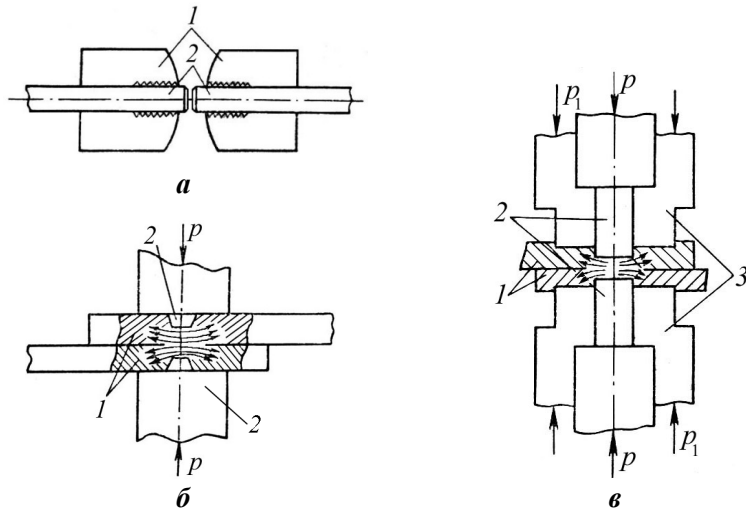


Рис. 1.7. Схема холодного стикового зварювання стрижнів 2, які знаходяться в затискачах 1 (а); напусткових з'єднань втисненням пуансонів 2 в деталі 1 (б); втисненням пуансонів 2 із попереднім стисненням деталей 1 пуансонами 3 (в)

Спільний плин металу при стисненні стрижнів (з'єднання встик) або під пуансонами в з'єднаннях унапусток руйнує поверхневі плівки та виносить їх за межі з'єднання, а великий тиск створює щільний контакт ювенільних поверхонь і запобігає доступу повітря в зону зварювання. Тиск у холодному зварюванні зазвичай в 1,5-2 рази перевищує твердість металу, що зварюється.

При ХЗ міжатомні зв'язки утворюються між кристалами, які до зварювання були віддалені від поверхні. Оскільки з'єднання формується в момент закінчення деформації, то час формування його кристалічної структури короткий і може оцінюватися частками секунди. Тому об'ємна взаємодія при ХЗ відсутня.

З'єднання внапуск можуть бути точковими, лінійними, кільцевими і шовними. Схему холодного шовного зварювання показано на рис. 1.8.

Холодне зварювання внапуск здійснюють шляхом втиснення пуансонів у попередньо стиснуті листи пуансонами 3 (див. рис. 1.7,в) або без них (див. рис. 1.7,б). В обох випадках необхідно забезпечити значний плин металу в зоні з'єднання для утворення ювенільних поверхонь та їх активації. Ступінь плину металу в площині з'єднання можна визначити за допомогою координаційної сітки, дослідивши її спотворення при зварюванні (рис. 1.9,а) [6]. На рис. 1.9,б показано ступінь плину залежно від глибини втиснення пуансона для різних металів [70]. Глибина втиснення пуансона визначається у відсотках від товщини листа.

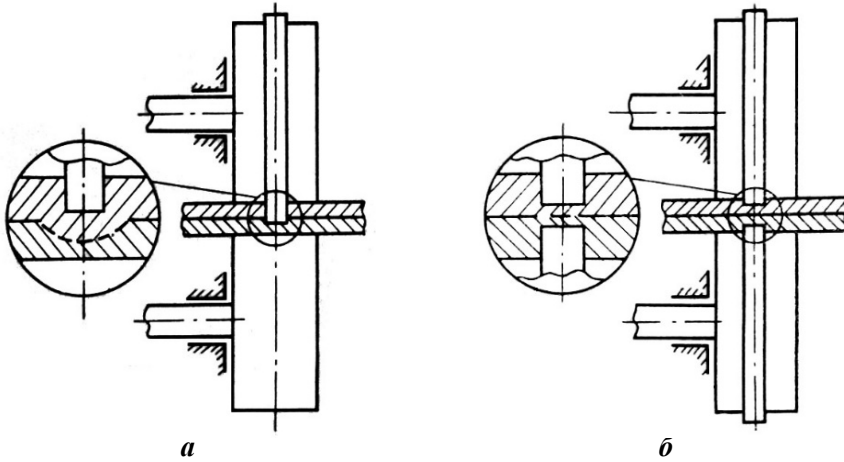
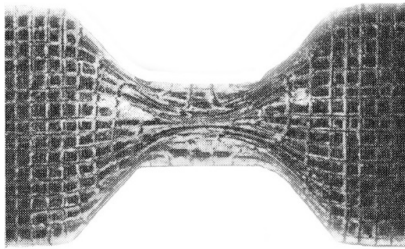
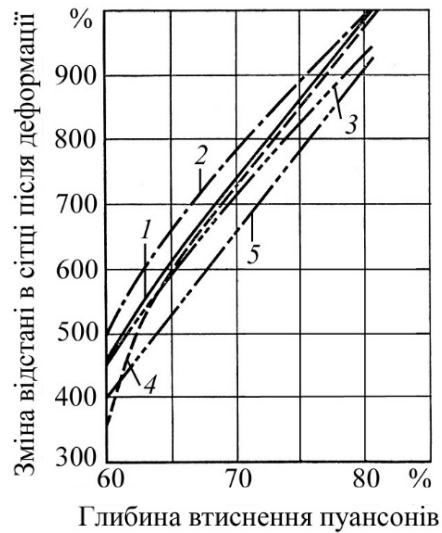


Рис. 1.8. Схема холодного шовного зварювання з одностороннім (а) і двостороннім (б) деформуванням



а



б

Рис. 1.9. Спотворення координаційної сітки (а) та вплив глибини втиснення пуансонів на відстань у координаційній сітці при ХЗ внапуск різних металів (ширина пуансона 4 мм, початкова відстань у сітці 0,5 мм):  
1 – Al; 2 – Cu; 3 – Pb; 4 – Sn; 5 – Cd

Ступінь плинності металу та умови ХЗ залежать від відношення діаметра  $d$  або ширини  $b$  пуансона до товщини листа  $\delta$ . Максимум плинності спостерігається, відповідно, при  $\frac{d}{\delta} = 2$  та  $\frac{b}{\delta} = 1$  [70].

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

Для оцінки деформації металу при ХЗ внапуск користуються глибиною втиснення пуансона  $\varepsilon = \frac{h}{\delta}$ , де  $h$  – глибина втиснення пуансона в метал.

Слід урахувати, що кореляція між ступенем плинності металу та відносною глибиною втиснення пуансона спостерігається лише при певній схемі деформації та незмінному співвідношенні розмірів пуансона і товщини листа.

Для різних металів, залежно від способу підготовки поверхонь та геометрії пуансонів, існує певна мінімальна величина втиснення пуансона  $\varepsilon_{\min}$ , необхідна для утворення міцного з'єднання (табл. 1.1).

**Таблиця 1.1. Необхідна величина деформації при холодному зварюванні деяких матеріалів унапуск [58]**

Метал	$\varepsilon_{\min}$ , %	Метал	$\varepsilon_{\min}$ , %
Індій	10...15	Срібло	82...86
Алюміній	55...60	Мідь	85...90
Алюмінієві сплави	75...80	Олово	85...88
Свинець	80...85	Нікель	85...90
Титан	70...75	Армко-залізо	85...92
Кадмій	82,5	Цинк	90,8

На рис. 1.10,*а* показано характер залежності міцності з'єднань від деформацій при ХЗ. Як видно з рисунка, поки деформація не досягне деякого критичного значення (цю деформацію називають *деформацією схоплювання*), міцність зчеплення дорівнює нулю.

Для м'якого алюмінію деформація схоплювання (критична деформація) дорівнює приблизно 45%. При подальшому збільшенні деформації міцність з'єднання швидко зростає, досягаючи максимуму при деформації 60...70%. Зниження міцності з'єднань після досягнення максимуму пояснюється зменшенням товщини металу в зоні зварювання і відривом зварної точки замість зрізу.

Вплив відносної глибини втиснення пуансона на міцність зварних з'єднань деяких металів показано на рис. 1.10,*б*.

Критична деформація залежить від чистоти поверхонь. Алюміній, мідь, свинець та інші метали з гранецентричними кристалічними ґратками, зачищені шабруванням у вакуумі  $1,3 \cdot 10^{-7}$  Па, схоплюються при деформації 5...8%. Ефективно впливає нанесення на з'єднувані поверхні високопластичного металу твердого покриття, наприклад електролітичне нанесення нікелю або хрому на мідь. При зварюванні твердий шар легко руйнується і виноситься плинном металу із зони зварювання, утворюючи ювенільні поверхні. Аналогічно може впливати наявність твердої оксидної плівки на поверхні металу.

## 1. 2. Холодне зварювання

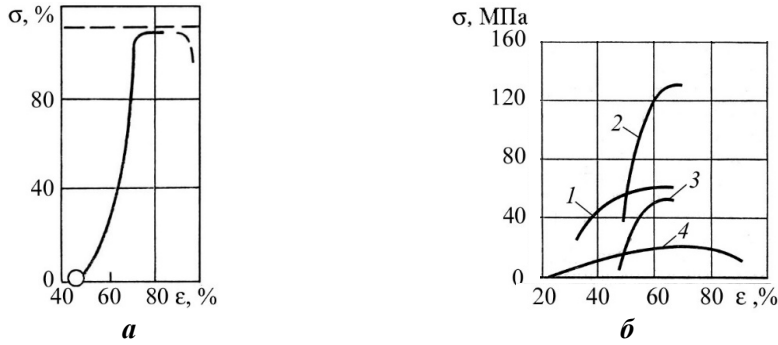


Рис. 1.10. Зміна міцності з'єднань відносно міцності основного металу (*a*) та міцність з'єднань деяких металів (*б*) залежно від ступеня втиснення пуансона при ХЗ:  
1 – алюміній у наклепаному стані; 2 – електролітична мідь; 3 – алюміній у відпаленому стані; 4 – олово

На рис. 1.11,*a* показано взаємозв'язок відношення твердостей оксидної плівки і металу та деформації схоплювання, а на рис. 1.11,*б* – залежність деформації схоплювання від спільного впливу середовища та часу витримки в ньому зачищених поверхонь до зварювання [70].

Як видно з рис. 1.11, чим більше співвідношення твердостей оксиду і металу, тим нижче деформація схоплювання, тобто кращі умови утворення ювенільних поверхонь. Спільний вплив середовища і часу витримки в ньому зачищених поверхонь до зварювання на деформацію схоплювання пов'язаний із товщиною адсорбованого шару газів і оксидної плівки на ювенільних поверхнях. Це підтверджується також даними табл. 1.2, в якій наведено дані про деформацію схоплювання міді в глибокому безмасляному вакуумі під тиском із попереднім зачищенням поверхонь механічним способом [70].

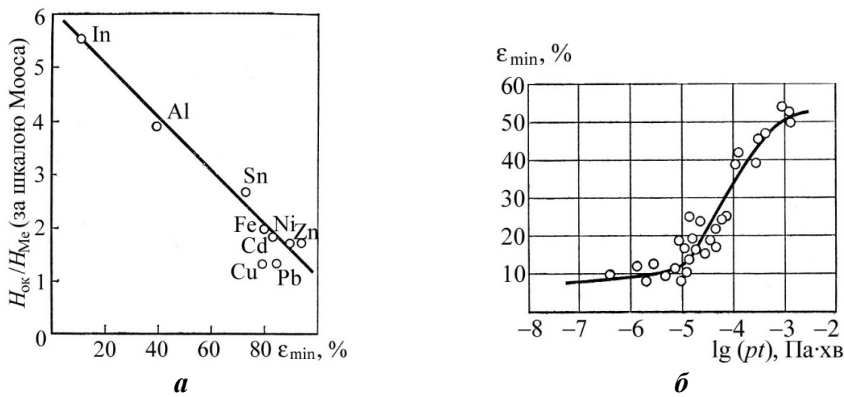


Рис. 1.11. Взаємозв'язок деформації схоплювання з відношенням твердостей оксидної плівки і металу (*a*) та деформації схоплювання алюмінію у вакуумі з величиною  $\lg(pt)$  (*б*)

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

Таблиця 1.2. Вплив вакууму на деформацію схоплювання міді під тиском протягом 1 хвилини

$p$ , Па	$\varepsilon_{\min}$ , %	$p$ , Па	$\varepsilon_{\min}$ , %	$p$ , Па	$\varepsilon_{\min}$ , %
$1,3 \cdot 10^{-3}$	38,0	$1,3 \cdot 10^{-5}$	20,0	$4,2 \cdot 10^{-7}$	8,0
$1,8 \cdot 10^{-4}$	30,0	$1,3 \cdot 10^{-6}$	19,3	$3,6 \cdot 10^{-7}$	7,0
$1,6 \cdot 10^{-4}$	29,4	$1,3 \cdot 10^{-6}$	18,6	$3,0 \cdot 10^{-7}$	6,9
$7,8 \cdot 10^{-5}$	21,0	$2,3 \cdot 10^{-6}$	10,7	$1,3 \cdot 10^{-7}$	6,9

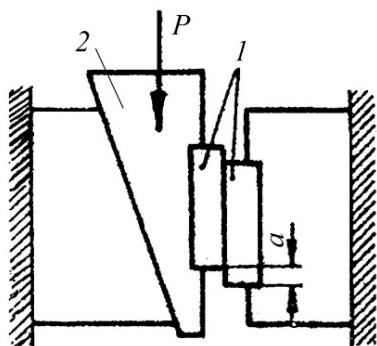


Рис. 1.12. Зварювання зсувом:

1 – деталі; 2 – клиновий пристрій

Холодне зварювання може виконуватися шляхом стиснення заготовок з їх одночасним відносним зсувом під дією тангенціальних зусиль (рис. 1.12).

При одночасній дії нормального і тангенціального зусиль, унаслідок невеликого відносного зміщення ( $a \approx 6 \dots 10$  мм) з'єднаних поверхонь, полегшуються процеси пластичної деформації металу в приповерхневих шарах, процеси утворення фізичного контакту та активації поверхонь. Це дозволяє значно зменшити тиск зварювання. Така схема холодного зварювання отримала назву **зварювання зсувом**.

Різновидом ХЗ алюмінієвих дротів є їх з'єднання у спеціальній оправці (муфті), які показано на рис. 1.13. Корпус та чотири гвинти муфти виготовляються з алюмінію або його сплаву. Кінець гвинта має форму конуса, діаметр на ділянці різьби в 2 рази більший, ніж за її межами до головки гвинта.

Муфта має перегородку, що ділить її наполовину. Дроти вставляються з обох сторін муфти до перегородки і в них втискаються гвинти шляхом закручування. При цьому відбувається деформація дроту, як показано на рис. 1.13,б. Гвинти закручують до їх зрізання на ділянці переходу від малого до більшого діаметра. У зоні з'єднання розвиваються деформації зсуву.

Для ХЗ характерні великі пластичні деформації, тому його застосовують для з'єднання високопластичних металів. Для з'єднання малопластичних металів розроблено схему зварювання з використанням прокладок із високопластичних металів. Наприклад, зварювання сталі можна виконувати з прокладкою з алюмінію або відпаленої міді. У цьому випадку з'єднуються різні метали.

Для утворення міцного з'єднання між різні металами також необхідна значна спільна пластична деформація, але процес ХЗ визначається активацією більш твердого металу.

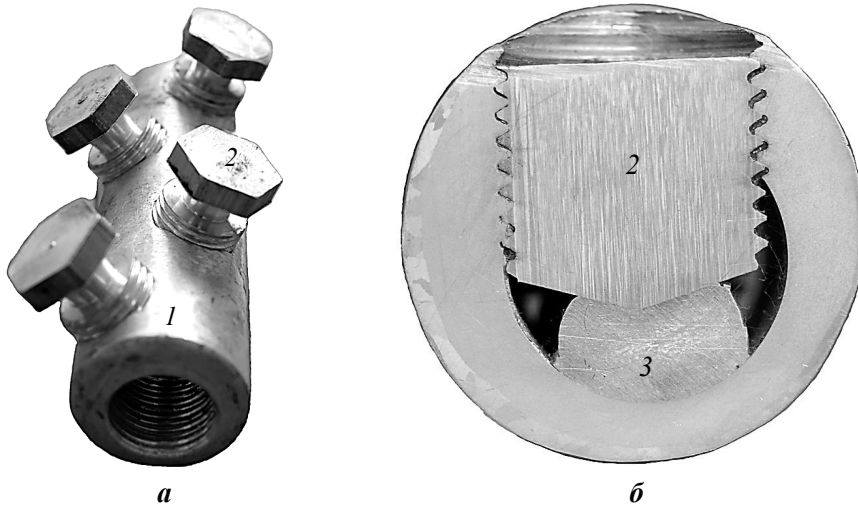


Рис. 1.13. Загальний вигляд (а) з'єднувальної муфти для ХЗ алюмінієвого дроту та макрошліф з'єднання (б):  
1 – корпус; 2 – гвинти змінного діаметра; 3 – дріт

Принципова відмінність ХЗ від інших способів зварювання тиском полягає в необхідності видалення оксидних плівок та адсорбованих газів із зони контакту механічним шляхом за рахунок інтенсивної пластичної деформації. Надалі пластична деформація, як і при інших способах зварювання тиском, забезпечує утворення фізичного контакту, активацію поверхонь, їх схоплювання та взаємодію, але ці процеси мають свої кінетичні особливості. При ХЗ величина накопиченої деформації, необхідної для утворення міцного з'єднання, значно більша, ніж при способах зварювання тиском із підігрівом.

Роль термічної активації при ХЗ незначна, що підтверджують дослідження зварювання алюмінію та срібла при температурах до  $-150$  і  $-170$  °С відповідно [6]. На результати зварювання не впливає також текстура металу, оскільки для більшості металів при кімнатній температурі кристалізаційні процеси проходити не можуть (за винятком деяких легкоплавких металів, наприклад галію, індію, свинцю, для яких кімнатна температура вища від температури рекристалізації).

Різко негативно на якість ХЗ впливають жирові забруднення, що вимагає ретельного знежирення поверхонь.

Холодне зварювання відбувається при низьких гомологічних температурах, для яких характерні лише низькотемпературні механізми процесу повернення в ході пружно-пластичної деформації та після зняття деформаційного зусилля. Чим вище енергія дефектів кристалічних ґраток



(наприклад, в алюмінію порівняно з міддю), тим легше перебігають процеси повернення і повніше проходить релаксація напружень. Процеси взаємодії дислокацій із міжвузольними атомами домішок та закріплення (блокування) дислокацій можуть впливати на ступінь деформаційного зміцнення та перешкоджати релаксації напружень. Ці процеси називають *динамічним деформаційним старінням* або *просто деформаційним старінням* залежно від того, які дислокації блокуються – рухомі чи нерухомі.

### 1.2.2. Технологія зварювання

Головним параметром процесу ХЗ є *пластична деформація металу в зоні з'єднання*. Необхідна для зварювання деформація залежить від властивостей металу, способу підготовки поверхонь і типу з'єднання. Для напусткових з'єднань необхідну величину деформації наведено в табл. 1.1 [58]. Така пластична деформація досягається створенням високих тисків при зварюванні.

Для визначення необхідного тиску  $p$  при втискуванні пуансонів можна скористатися схемою, наведеною на рис. 1.14, та рівнянням

$$p = \sigma_T \left( 1 + \frac{d}{6(\delta - h)} - \ln \frac{D}{d} \right), \quad (1.1)$$

де  $D$  – діаметр зони деформації металу.

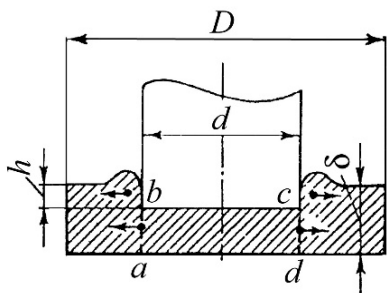


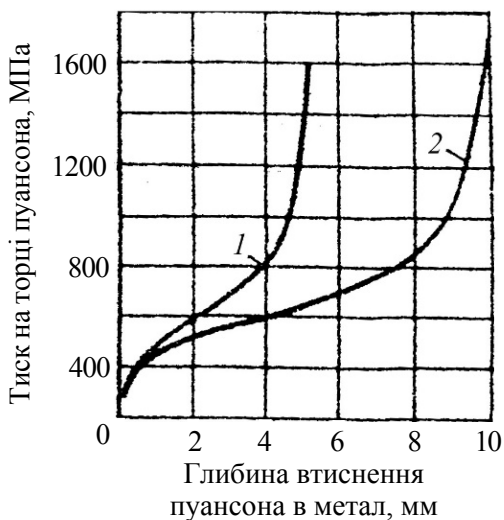
Рис. 1.14. Схема втискування пуансона в метал

Перші два члени в дужках формули (1.1) визначають тиск, необхідний для деформування циліндричної заготовки  $abcd$  під пуансоном без впливу навколишньої маси металу, третій член  $\ln \frac{D}{d}$  враховує цей вплив.

Із рівняння (1.1) видно, що тиск на торці пуансона зростає зі збільшенням глибини втискування  $h$ , що підтверджується експериментально (рис. 1.15).

З'єднання внапуск, отримані втискуванням пуансонів постійного перерізу, мають відносно низьку міцність і при випробуванні на розтягування–зріз руйнуються з вирином зварної точки. При втискуванні пуансонів із заплечиками (див. рис. 1.7,б) або з попереднім стисненням деталей (див. рис. 1.7,в) міцність з'єднання зростає, тому що з'єднання утворюється не тільки під пуансонами, але і в деякій навколишній зоні.

Рис. 1.15. Вплив глибини втиснення пуансона в метал на тиск на торці пуансона при зварюванні алюмінію товщиною 5 мм (1) і 10 мм (2) за схемою з попереднім стисненням деталей



При використанні пуансонів із заплечиками (див. рис. 1.7,б) якісні з'єднання утворюються при стисненні металу в периферійній зоні зварної точки опорною частиною пуансона. Площа торця робочого виступу пуансона завжди набагато менша від площі опорної частини. Тому зусилля, розрахованого на стиснення металу навколо зварної точки, достатньо для проникнення робочого виступу в метал. Для зварювання алюмінію тиск на опорній частині пуансона складає 110...120 МПа.

При використанні схеми рис. 1.7,в зусилля розраховуються за необхідним тиском на торці пуансона в кінці процесу деформації. Для алюмінію цей тиск знаходиться в інтервалі 400...1500 МПа. Тиск попереднього стискування навколо зварної точки складає 30...50 МПа і створюється до або одночасно з початком руху робочого пуансона 2. Ступінь відносного втиснення пуансона в метал вибирається, виходячи з необхідної міцності зварного з'єднання. Значення цієї величини для алюмінію найчастіше лежить у межах 70...90 % від товщини заготовок. При ХЗ різновтовщинних заготовок і односторонньому втисненні пуансона глибина втиснення повинна складати 55...60 % від їх сумарної товщини. Деформацію проводять зі сторони більш тонкого металу.

Ширину або діаметр пуансона вибирають рівними 1...3 товщинам листів. Для шовного зварювання алюмінію рекомендуються ролики діаметром  $50\delta$  із робочим виступом шириною  $(1,0...1,5)\delta$ , висотою  $(0,8...0,9)\delta$  і шириною опорної частини  $(2,0...4,5)\delta$ , де  $\delta$  – товщина металу, який зварюється. Тиск пуансона складає 300...600 МПа для відпаленого алюмінію, 2000 МПа – для міді.

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

Для ХЗ двох циліндричних заготовок тиск визначається рівнянням

$$p = \sigma_{\tau} \left( 1 + \frac{d}{6h} \right), \quad (1.2)$$

де  $h$  – довжина частини заготовок, яка деформується (відстань між затискачами заготовок).

За рівнянням (1.2) знаходиться тиск також при з'єднанні металів із високопластичними прокладками. При цьому слід враховувати розподіл напружень та наявність різних зон по радіусу (зони застою, гальмування та плину), що впливають на процес зварювання.

При ХЗ встик тиск дорівнює 700...800 МПа для алюмінію, 2000...2500 МПа – для міді, 1500...2000 МПа – для міді з алюмінієм. Довжина вильоту стрижня  $l_0$  знаходиться в межах  $(1,0...1,2)d$  для алюмінію,  $(1,25...1,50)d$  – для міді, де  $d$  – діаметр стрижня. Для заготовок прямокутного перерізу виліт дещо більший, ніж для циліндричних, при ширині, яка дорівнює діаметру, та однакових інших умовах. Величина вильоту заготовки може змінюватися в досить широкому діапазоні. Основною умовою визначення цього параметра є необхідність симетричної відносно стику деформації металу без втрати стійкості кінців заготовок. Зі збільшенням діаметра (товщини) стрижня абсолютне значення вильоту зростає, але його відношення до діаметра зменшується. Для алюмінію виліт змінюється від  $0,5d$  для  $d = 30$  мм до  $1,0d$  для  $d = 1...3$  мм. Для міді виліт змінюється від  $0,75d$  до  $1,10d$  відповідно для діаметрів 2 і 20 мм. Звичайно, можуть бути і відхилення від цих значень.

При зварюванні різнорідних металів виліт заготовки з більш твердого і менш пластичного металу є більшим.

При ХЗ алюмінію з міддю виліт мідного стрижня повинен бути на 30...40 % більше, ніж алюмінієвого. Якщо досягти необхідної деформації при одноразовому осаджуванні неможливо через втрати стійкості кінця заготовки, то проводять дворазове осаджування. Необхідний тиск визначається пластичністю металу, розмірами кінця заготовки, конструкцією затискача тощо. Робоче зусилля в процесі ХЗ постійно зростає. Тому воно повинно визначатися за необхідним кінцевим значенням. Зусилля затиснення заготовок у затискачах із насічкою звичайно повинне перевищувати 50 % зусилля осаджування при зварюванні алюмінію і 80 % при зварюванні міді.

Сплави зварюються гірше, ніж чисті метали, наприклад чистий алюміній зварюється відмінно, а його сплави – погано. Для наближеної оцінки здатності сплавів до ХЗ можна користуватися величиною їх твер-

## 1. 2. Холодне зварювання

дості. З підвищенням твердості зварювання погіршується і необхідна мінімальна деформація металу  $\epsilon_{\min}$  зростає, оскільки знижуються інтенсивність пластичного плину металу в зоні контакту та активація поверхонь.

Високі пластичні деформації при ХЗ значно зміцнюють метал, тому міцність стикових з'єднань вище від міцності основного металу. При зварюванні внапуск міцність з'єднань визначають міцністю зварної точки та можливістю вириву точки замість зрізу.

Холодне зварювання використовують при виготовленні виробів з алюмінію та міді як в однорідних, так і в різнорідних з'єднаннях. Іноді зварюють також срібло, золото, свинець, нікель, кадмій, олово, цинк і ніобій.

Швидкоплинність і низькі температури процесу обмежують об'ємну взаємодію металів. Тому ХЗ можна з'єднувати різнорідні метали без утворення крихких інтерметалідних прошарків.

Мікроструктуру з'єднання міді з алюмінієм показано на рис. 1.16. Інтерметалідні фази в стику відсутні.

Технологія ХЗ включає в себе такі операції: підготовку заготовок до зварювання, складання, зварювання, видалення облою при зварюванні встик, контроль якості зварювання.

Метою підготовки поверхонь до ХЗ є видалення жирових та масляних забруднень. На виробництві використовують один з таких способів:

- механічне зачищення стальними обертовими щітками;
- ретельне знежирення поверхонь різними розчинниками та ультразвуковим методом;
- прожарювання алюмінієвих заготовок при температурі 300...400 °С і вільному доступі повітря для утворення оксидних плівок та видалення жирових забруднень;
- покриття поверхні міді тонким (6...20 мкм) твердим шаром гальванічного нікелю або хрому;
- обрізування кінця заготовки перпендикулярно до її осі чистим інструментом.

Вплив підготовки поверхонь до ХЗ на якість зварювання видно з табл. 1.3.

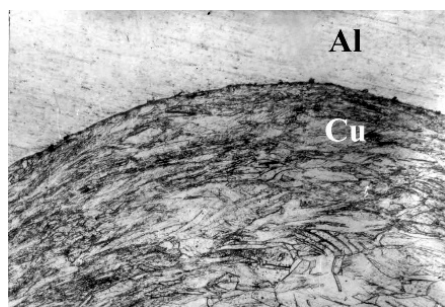


Рис. 1.16. Мікроструктура з'єднання міді з алюмінієм, отриманого ХЗ;  $\times 100$

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

*Таблиця 1.3. Міцність з'єднання зразків з алюмінію товщиною 2 мм при холодному зварюванні втисненням пуансона діаметром 6 мм [6]*

Обробка поверхонь перед зварюванням	Руйнівна сила при випробуваннях на зсув, Н		
	мінімальна	максимальна	середня
Зачищення сталюю щіткою	2100	2500	2350
Те ж з наступним натиранням руками	1150	1185	1550
Те ж з наступним змащуванням маслом і витиранням ганчіркою	350	1150	800
Те ж з натиранням парафіном	0	0	0

Негативний вплив органічних плівок пов'язаний із тим, що вони важко видаляються із зони з'єднання при деформації. Між молекулами органічної речовини і поверхневими атомами металу утворюється відносно міцний зв'язок, і тонка плівка набуває пружності твердого тіла [6]. Товщина плівки не лімітується мономолекулярним шаром, але чим більшою є товщина, тим менше виявляються властивості пружного тіла.

Кінетику деформування металу, утворення з'єднання та облою при ХЗ встик показано на рис. 1.17. У верхньому ряду наведено фотознімки макрощліфів, а в нижньому – схематичне зображення плинусу металу.

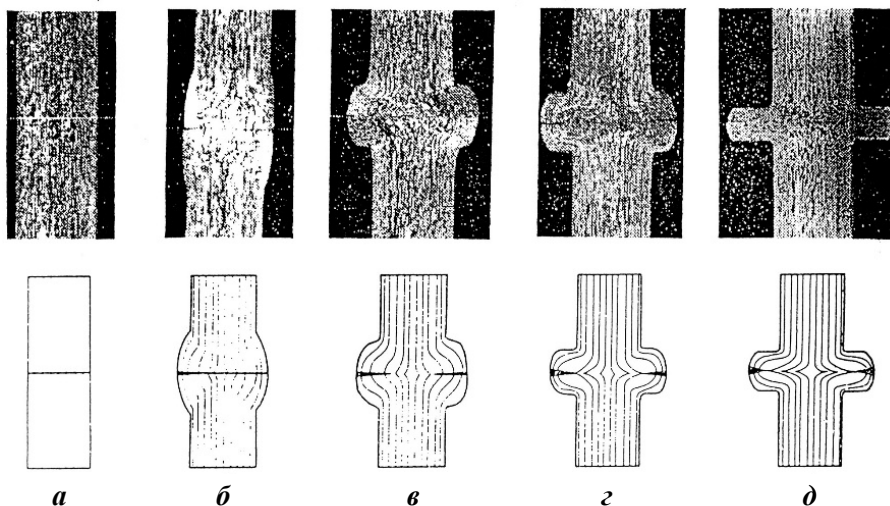


Рис. 1.17. Розвиток пластичної деформації металу при ХЗ

Режими ХЗ визначаються із врахуванням наведених вище закономірностей та рекомендацій. Перед зварюванням поверхні зачищають від забруднень і знежирюють. Гарні результати дає обробка обертовою

металевою щіткою. При зварюванні встик дротів тільки обрізають торці. В усіх випадках необхідно особливо ретельно стежити, щоб на з'єднувані поверхні не потрапляли жирові і масляні забруднення, які навіть при дуже великих тисках можуть залишатися у вигляді мономолекулярного шару, перешкоджаючи зварюванню.

Видалення облою після ХЗ встик може виконуватися на зварювальному обладнанні, для чого кромки затискачів загострюються під кутом  $60^\circ$ .

### *1.2.3. Зварювальне устаткування*

Для ХЗ використовується як спеціалізоване, так і стандартне пресове та прокатне устаткування. Розрізняють устаткування для стикового, точкового та шовного зварювання. Залежно від конструктивного оформлення на точкових машинах можна отримати одно- та багатоточкові з'єднання. За винятком вузькоспеціалізованих машин, устаткування для ХЗ можна переналагоджувати для виготовлення різних деталей шляхом заміни робочого інструмента (пуансони, штампи тощо).

Устаткування для ХЗ встик має затискні пристрої з механізмами ручного, гідравлічного або пневматичного затиснення дроту, пристрій для спрямування руху заготовок, механізм осаджування, апаратуру керування, допоміжні механізми і пристрої для обрізування кінців заготовок та видалення облою.

Затискні пристрої виконуються рознімними з двох частин, між якими передбачається гарантований зазор величиною  $2 \dots 5\%$  товщини або діаметра заготовки. Вони повинні відповідати конфігурації перерізу деталі та мати насічку для запобігання прослизанню заготовки при зварюванні. Глибина насічки повинна складати  $3 \dots 4\%$  діаметра або товщини заготовки, але не більше  $0,35 \dots 0,40$  мм. Краще використовувати механізми кулачкового та клинового типів, що дозволяє зменшити затискне зусилля до  $45\%$  від зусилля осаджування. Затискне зусилля створюється вручну при зварюванні заготовок малих перерізів або за допомогою пневмо- і гідроциліндрів для великих перерізів. Деформуюче зусилля забезпечується пневмо-, гідро- або пневмогідромеханізмами. При зварюванні дротів малих діаметрів за допомогою кліщів деформуюче зусилля (біля  $12$  кН) створюється мускульною силою зварника (біля  $200$  Н на рукоятці). Керування роботою гідро- і пневмоциліндрів забезпечується за допомогою кранів або золотникових пристроїв з електромагнітним приводом. Робота останніх може забезпечуватися вручну або певною програмою, залежно від ступеня автоматизації процесу зварювання. Машини, зазвичай, для підготовки заготовок до ХЗ комплектуються відрізними механізмами (ножами) з пневматичним або гідравлічним

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

приводом. При зварюванні ручними кліщами останні мають спеціальні кусачки.

До складу установок для зварювання внапуск входять зварювальний інструмент (пуансони, штампи, ролики), прес для забезпечення робочого зусилля, затискні та спрямовуючі пристрої, апаратура керування та допоміжні пристрої для зачищення поверхні деталей.

Для виконання ХЗ випускається спеціальне устаткування [73, 78]. Розроблено серію машин МСХС для холодного стикового зварювання на максимальне зусилля осаджування від 50 до 1200 кН. Для точкового зварювання алюмінієвих шин товщиною 5 + 5 мм у монтажних умовах призначено установку УГХС-5. Армування наконечників алюмінієвих обмоток, шин та інших деталей мідними накладками виконується за допомогою машини МХСА-50. Напівавтомат МХСК-5 призначений для герметичного зварювання алюмінієвих корпусів конденсаторів із кришкою. Розроблено машину МСХС-80 для стикового зварювання алюмінію перерізом 100...10000 мм<sup>2</sup>, міді – 100...600 мм<sup>2</sup> і міді з алюмінієм перерізом 100...800 мм<sup>2</sup>.

Холодне стикове зварювання може виконуватися як з одноразовим, так і багаторазовим осадженням із щоразовим установленням вильоту деталей у затискачах.

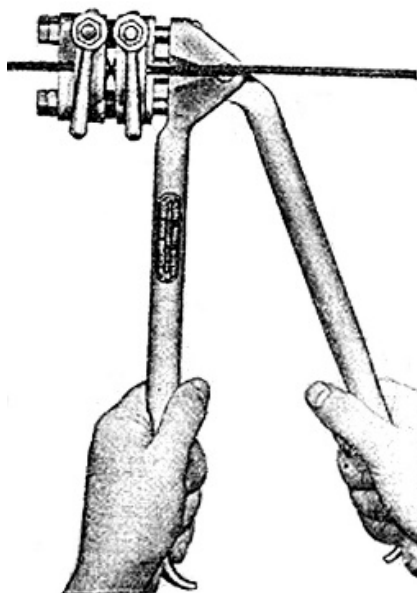


Рис. 1.18. Кліщі КС-6 для ХЗ дротів устик

Ручні кліщі КС-6 для ХЗ дроту показано рис. 1.18.

Для зварювання трамвайних дротів сьогодні широко застосовують спеціальні муфти (див. рис. 1.12,б), в яких з'єднання формується за рахунок деформації зсуву.

Схему машин К-609М для герметизації корпусів силових напівпровідникових приладів за допомогою ХЗ показано на рис. 1.19.

Для ХЗ внапуск із попереднім затисканням заготовок застосовують спеціальні штампи. Наприклад, на рис. 1.20 показано схему штампа для армування алюмінієвих шин мідними накладками.

## 1. 2. Холодне зварювання

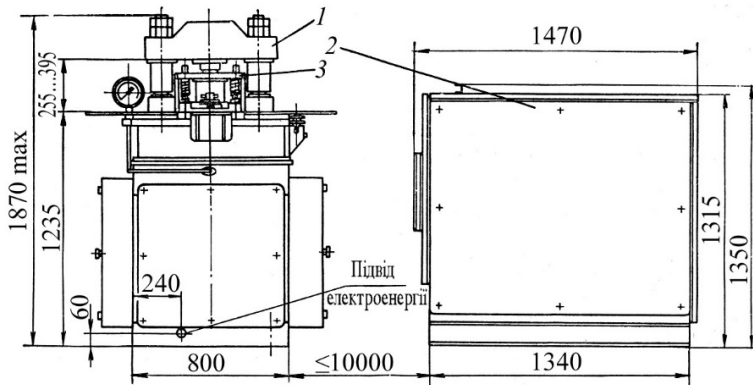


Рис. 1.19. Схема машини К-609М для зварювання корпусів силових напівпровідникових приладів:

1 – прес; 2 – станція гідрообладнання; 3 – зварювальний штамп

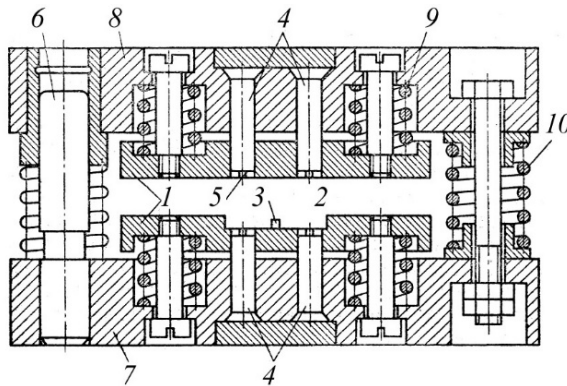


Рис. 1.20. Схема штампа для армування алюмінієвих шин мідними накладками

Конструкція штампа (нижня 7 і верхня 8 частини) забезпечує втиснення пуансонів 4 з робочим виступом 5 лише після затиснення заготовок плитами 1. Напрявні 6 зберігають співісність пар пуансонів у процесі зварювання. Заготовки розміщуються у вікнах 2. При цьому висота пазів вибирається такою, щоб при повному стисненні заготовок між плитами залишався зазор 0,5 мм. Штамп має виступ 3 для центрування, пружини 9 для попереднього затискання заготовок і 10 для розкриття штампа. Такі штампи зручно застосовувати при багатоточковому з'єднанні.

### 1.2.4. Особливості та сфери застосування холодного зварювання

Основною перевагою ХЗ є відсутність зовнішнього підігріву й об'ємної взаємодії в контактні металів, що дозволяє зварювати різнорідні



## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

---

*метали, які утворюють при інших способах зварювання інтерметаліди. Холодне зварювання забезпечує високу пластичність і міцність цих з'єднань, наприклад міді з алюмінієм.*

*Зварний шов при ХЗ металу не забруднюється домішками, має високу однорідність та високі показники корозійної стійкості і стабільності електричного опору. Простота підготовки деталей до зварювання і контролю параметрів режиму, відсутність допоміжних матеріалів, газових і теплових виділень, можливість дистанційного керування та швидкість процесу роблять ХЗ зручним для використання, не вимагають високої кваліфікації зварника-оператора. Питомі витрати енергії на зварювання приблизно на порядок менші, ніж при зварюванні плавленням. Застосування холодного зварювання покращує гігієнічні умови на виробництві. Однак слід враховувати, що для ХЗ кожного конкретного виробу потрібно мати інструмент індивідуальної конструкції. Необхідно суворо стежити за виключенням можливості забруднення підготовлених до зварювання поверхонь. При зварюванні внапуск на виробках залишаються глибокі вм'ятини – сліди від інструмента.*

*Слід також відзначити, що відсутність об'ємної взаємодії при ХЗ однорідних металів впливає на пластичність з'єднань. Тому іноді при зварюванні або після нього застосовують підігрів. Тоді процес називають пресовим зварюванням або пресовим зварюванням із підігрівом [6, 70].*

*Діапазони розмірів перерізу і товщин заготовок при ХЗ досить широкі. Точковим зварюванням з'єднують листи товщиною від 0,1 до 10 мм. Для попередження короблення деталей ХЗ внапуск товщин більше 4 мм повинно проводитися з їх обов'язковим попереднім затисненням. Різновтовщинність заготовок може складати 1:4 і більше. Отримано стикові з'єднання дротів і прутків діаметром 0,8...30 мм, смуг прямокутного перерізу з максимальною площею до 1000 мм<sup>2</sup> для міді та до 1500 мм<sup>2</sup> для міді з алюмінієм.*

*Оптимальною атомною будовою металів для холодного зварювання є гранецентричні кубічні ґратки: алюміній, мідь, нікель, свинець, срібло, золото, γ-залізо. Сплави зварюються значно гірше.*

*Холодне зварювання найбільш широко застосовується в електротехнічній промисловості та на транспорті для з'єднання алюмінієвих і мідних дротів, а також алюмінієвих дротів із мідними наконечниками, в електромонтажному виробництві, при виробництві теплообмінників та побутових приладів.*

### 1.3. Ультразвукове зварювання

#### 1.3.1. Суть способу

Ультразвукове зварювання (*ultraschallschweissen; ultrasonic welding; ультразвуковая сварка*) – це зварювання тиском при дії ультразвукових коливань (УЗК). З'єднання утворюється в результаті спільної дії на деталі стискального зусилля і УЗК, що супроводжується відносним тангенціальним зміщенням малої амплітуди з'єднуваних поверхонь і нагріванням металу в зоні зварювання. Зусилля діє перпендикулярно до з'єднуваних поверхонь, а коливання викликають їх незначний зсув з ультразвуковою частотою (більше 18 кГц). При цьому відбувається невелика пластична деформація приповерхневого шару металу в зоні зварювання і утворення ювенільних поверхонь та їх з'єднання. Тривалість ультразвукового зварювання (УЗЗ) вимірюється секундами і частками секунди. Ультразвукові коливання збуджуються в магнітострикційному перетворювачі і за допомогою трансформатора коливань (хвилеводу), який збільшує їх амплітуду, і зварювального інструмента передає коливання до зони зварювання. Зазвичай амплітуда коливань дорівнює 14...25 мкм.

Застосовують УЗЗ для одержання точкових і шовних з'єднань, а також для зварювання по контуру (рис. 1.21) [70, 84].

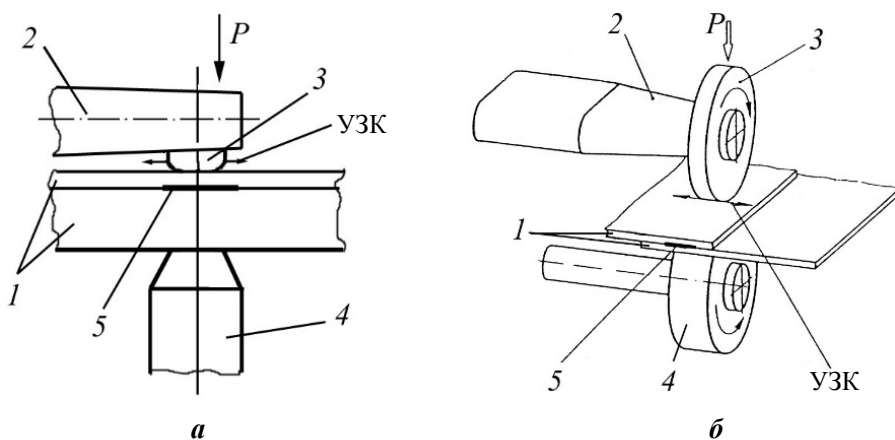


Рис. 1.21. Принципова схема точкового (а) і шовного (б) зварювання ультразвуком:

- 1 – зварювані деталі; 2 – трансформатор пружних коливань;  
3 – зварювальний наконечник (ролик); 4 – маятникова опора (опорний ролик);  
5 – зварна точка (шов); P – стиска сила

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

Зварювальний наконечник 3 (при шовному зварюванні – ролик) визначає площу та об'єм джерела ультразвукових механічних коливань безпосередньо в зоні зварювання. Він повинен передавати коливання для здійснення тертя між поверхнями з'єднуваних деталей із мінімальними втратами між ним і верхньою деталлю.

Процес УЗЗ відбувається в умовах тертя, викликаного мікроскопічним відносним зворотно-поступальним переміщенням ділянок поверхонь у зоні стискування, що супроводжується виділенням теплоти.

Розповсюдження УЗК при зварюванні показано на рис. 1.22.

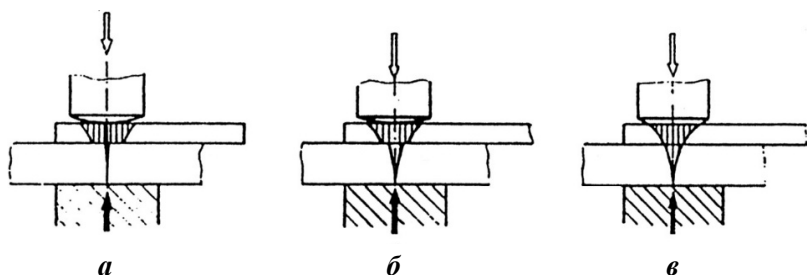


Рис. 1.22. Розповсюдження УЗК при зварюванні:

*a* – початок зварювання; *б* – процес зварювання; *в* – кінець зварювання

Дослідження показали, що при УЗЗ діють два основних джерела тепла. Одне знаходиться в зоні контакту зварювального наконечника (ролика) з деталлю, друге – у зоні з'єднання деталей. Виділення теплоти біля зварювального наконечника обумовлено його тертям із деталлю і призводить до пластичного деформування зовнішньої поверхні деталі під наконечником. Виділення теплоти між деталями обумовлено дією нормальних стискуючих напружень і напружень зсуву, що призводить до зовнішнього і внутрішнього тертя в металах і пластичної деформації в зоні зварювання.

Вібруючий зварювальний наконечник у перший момент зварювання розвиває інтенсивне виділення тепла в зоні його контакту з деталлю.

Уявлення про максимальні температури в зоні зварювання різних металів дає табл. 1.4.

Таблиця 1.4. Температури в зоні зварювання металів

Матеріал	Товщина $\delta$ , мм	Час зварювання $t$ , с	Зусилля стискування $P$ , Н	Температура $T$ , °С
Алюміній	0,5 + 0,5	0,5	2000	200...300
Мідь	1,0 + 1,0	1,5	4400	300...350
Цинк	0,85 + 0,85	0,6	2200	100...150

### 1. 3. Ультразвукове зварювання

Продовж. табл. 1.4

Матеріал	Товщина $\delta$ , мм	Час зварювання $t$ , с	Зусилля стискування $P$ , Н	Температура $T$ , °С
Залізо	0,4 + 0,4	0,4	2600	800...900
Залізо+константан	10,0 + 0,65	1,6	1900	До 730
Мідь+константан	0,3 + 0,65	1,0	400	До 450

Максимальна температура залежить від амплітуди коливань та стискального зусилля. Характер цієї залежності при зварюванні заліза ( $\delta = 10$  мм) з константаном ( $\delta = 0,65$  мм) показано на рис. 1.23.

Із рис. 1.23 видно, що збільшення амплітуди УЗК від 10 до 30 мкм підвищує максимальну температуру в контактi між деталями від 400 до 900 °С. Цей вплив пов'язаний зі збільшенням енергії звукового поля та інтенсивності ультразвукової енергії. Середня густина енергії звукового поля  $E$  залежить від густини середовища  $\rho$ , кутової частоти  $\omega$  та амплітуди УЗК  $\xi_m$ :

$$E = \frac{1}{2} \rho \omega^2 \xi_m^2 \quad (1.3)$$

Інтенсивність енергії плоскої поздовжньої звукової хвилі

$$I = k \xi_m^2 f^2 \rho c,$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності;  $f$  – частота коливань;  $c$  – швидкість звуку в середовищі (див. рівняння (1.3)).

Потік енергії хвилі  $\Phi$  через поверхню  $S$  можна записати як

$$\Phi = \int_S I \cdot ds \cos \beta,$$

де  $\beta$  – кут між перпендикуляром до поверхні  $S$  і напрямком хвилі.

Зусилля стискування забезпечує передачу УЗК до зони зварювання. Його мінімальне значення, при якому починають утворюватися з'єднання, залежить від зварюваних матеріалів та їх товщин, а оптимальне значення зростає зі збільшенням амплітуди УЗК. При збільшенні контактного тиску початкова швидкість нагрівання зростає за рахунок покращення зв'язку між зварювальним наконечником і деталями. Швидкість нагрівання деталей залежить також від форми та стану поверхні наконечника.

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

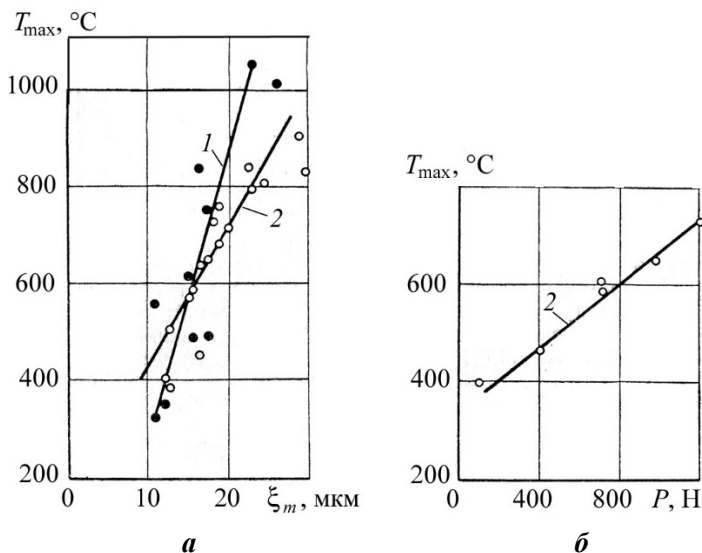


Рис. 1.23. Залежність максимальної температури від величини амплітуди  $\xi_m$  УЗК при зусиллі стискування 700 Н (а) і від стискального зусилля при амплітуді 14...16 мкм (б): 1 – у контакті під зварювальним наконечником; 2 – у контакті між деталями

Сумісний вплив дії УЗК та зусилля стискування на температуру в зоні зварювання алюмінію товщиною 0,5 + 0,5 мм показано на рис. 1.24 [70].

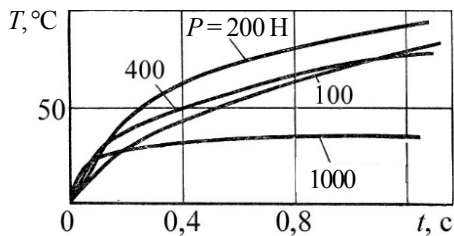


Рис. 1.24. Вплив часу дії УЗК та зусилля стискування на температуру в контакті між деталями при УЗЗ алюмінію товщиною 0,5 + 0,5 мм

При надмірному зусиллі температура в контакті між деталями значно зменшується внаслідок виходу з резонансу коливальної системи і зниження величини енергії, що передається в контакт між деталями.

Температура в зоні зварювання залежить від твердості і теплофізичних властивостей зварюваних матеріалів, потужності коливальної системи та параметрів режиму зварювання. Нагрівання в зоні зварювання звичайно не перевищує 0,6 температури плавлення. Під дією тертя, нагрівання і пластичного деформування плівки забруднень руйнуються, дезорієнтуються і видаляються із зони стискування, завдяки чому стає

### 1. 3. Ультразвукове зварювання

---

можливим утворення вузлів схоплювання, їх розширення і формування зварного з'єднання. Встановлено, що УЗК сприяють видаленню жирових плівок завдяки розвитку кавітаційних процесів в умовах дії в окремих мікрооб'ємах поперемінних високих тисків та розріджень. Тому УЗЗ може виконуватися навіть при наявності жирових забруднень поверхонь. Однак прийнято знежирювати поверхні перед зварюванням, оскільки це збільшує діаметр точок зварювання. Ультразвукові коливання також знижують поверхневий натяг металів, значно прискорюють утворення активних центрів і схоплювання поверхонь, процеси дифузії та рекристалізації. Тому формування кристалічної структури в зоні з'єднання при УЗЗ відбувається досить швидко.

Ультразвукове зварювання може виконуватися з імпульсним нагріванням місця зварювання від окремого джерела тепла, що дозволяє зменшити зусилля стиснення, амплітуду і час дії УЗК та деформації металу. Такий спосіб розроблено для УЗЗ мікродеталей. Зварювані елементи підлягають дії УЗК і нагріванню одночасно або в певній послідовності. Процес виконується наступним чином. Спочатку зварювальний інструмент невеликим зусиллям притискається до деталей, потім через нього пропускається електричний струм для його нагрівання та одночасно (або з певним випередженням, або запізненням) включаються УЗК. Спосіб дозволяє зварювати матеріали з різними фізико-хімічними властивостями.

Існує думка, що успішне УЗЗ різнорідних матеріалів можливе за умови різниці атомних радіусів з'єднуваних металів не більше 15...18%. Ця умова відповідає загальному уявленню про існування твердих розчинів. При різниці атомних радіусів у межах 19...44% зварювання металів ускладнюється, але за допомогою УЗЗ отримано надійні з'єднання між матеріалами з істотними різницями атомних радіусів та відмінностями фізико-хімічних властивостей між керамікою і металами. Утворення з'єднань пояснюється певним переміщенням металу в зоні зварювання. Деформація мікровиступів під дією коливань і стиснення призводить до взаємного проникнення і перемішування матеріалів, які з'єднуються, що і забезпечує якість зварювання.

При УЗЗ виділяють процеси утворення фізичного контакту, активації поверхонь та певної об'ємної взаємодії, незважаючи на короткочасність процесу. Під впливом довготривалої дії УЗК можливе зниження міцності з'єднань унаслідок часткового руйнування вузлів схоплювання [84].

**1.3.2. Технологія зварювання**

Основними параметрами режиму УЗЗ є зусилля стискування (контактне зусилля)  $P$ , час зварювання  $t$ , амплітуда  $\xi_m$  і частота  $f$  УЗК. Важливе значення мають потужність обладнання, форма та стан поверхні зварювального наконечника. Оскільки потужність ультразвукового перетворювача, частота та амплітуда УЗК визначаються характеристиками ультразвукового обладнання, то його потрібно вибирати стосовно конкретних деталей. Зусилля стиснення та час зварювання легко регулюються при розробці режиму зварювання. Зварювальний наконечник працює в складних термодформаційних умовах. Тому його матеріал, форма та обробка поверхні також визначаються матеріалами, що зварюються.

Вплив тривалості дії УЗК на руйнівне зусилля і міцність з'єднань при зрізі, а також площу вузлів схоплювання при зварюванні мідних зразків ( $\delta = 0,35 + 0,35$  мм) показано на рис. 1.25 [70].

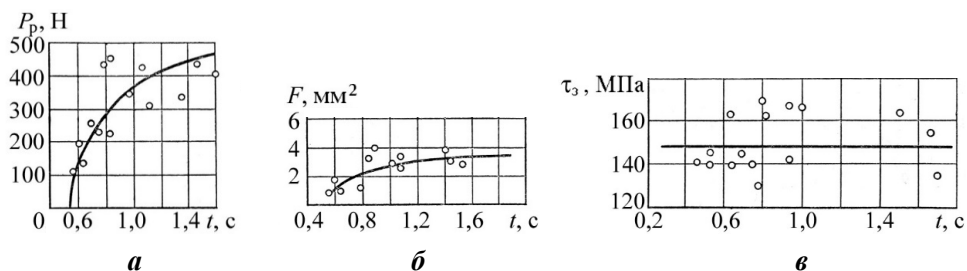


Рис. 1.25. Залежність руйнівного зусилля (а), площі з'єднання (б) та границі міцності при зрізі (в) від часу УЗЗ

Із рис. 1.25,а видно, що руйнівне зусилля зростає зі збільшенням часу зварювання. Це пояснюється розширенням площі з'єднання (див. рис. 1.25,б), оскільки границя міцності не змінюється (в). Аналогічні результати отримані при УЗЗ алюмінію. Випробування зварних з'єднань мідних зразків на відрив показали границю міцності біля 200 МПа. Це свідчить про утворення у вузлах схоплювання металічних зв'язків, що мають таку ж природу і міцність, як основний метал.

Сумісний вплив контактного зусилля та часу зварювання алюмінієвих пластинок унапуск на руйнівне зусилля при розтягуванні–зрізі показано на рис. 1.26 [70].

При малих контактних тисках міцність зварної точки значною мірою залежить від часу дії УЗК. Чим більшим є стискальне зусилля, тим менший час дії УЗК забезпечує високу міцність з'єднань. Як видно з рис. 1.23,б, зі збільшенням стискального зусилля значно зростає також максимальна температура, якщо зусилля не надмірне і не впливає на

резонансний стан коливальної системи. При дуже тривалому часі дії УЗК спостерігаються значні пластичні деформації металу, його приварювання до наконечника та погіршення якості зварювання.

Як було показано на рис. 1.23,а, суттєво впливає на максимальну температуру в контактї між деталями величина амплітуди УЗК. Вона аналогічно впливає на міцність з'єднань (рис. 1.27).

Численні дослідження показали, що для кожного конкретного випадку залежності міцності з'єднань на зсув від амплітуди УЗК існує своє оптимальне значення амплітуди. Оптимальні та граничні значення амплітуди УЗК визначаються властивостями і товщиною зварюваних матеріалів, величиною зусилля стискування і часом зварювання. Мінімальне значення амплітуди обумовлене необхідністю відносного переміщення в контактї між деталями для нагрівання та активації металу в зоні з'єднання. Мінімальне значення амплітуди УЗК збільшується з ростом товщини і твердості металу верхньої деталі.

Максимальне значення амплітуди не повинне призводити до руйнування з'єднання, отриманого на більш ранній стадії зварювального циклу, руйнування основного матеріалу та недопустимих деформацій.

Слід відзначити, що ефективна передача УЗК від зварювального наконечника можлива лише при певних значеннях амплітуди УЗК і контактного зусилля.

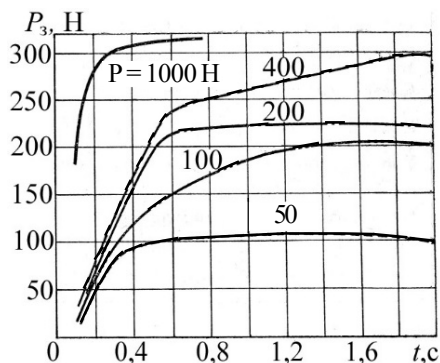


Рис. 1.26. Вплив часу дії УЗК та зусилля стискування на руйнівне зусилля при зварюванні алюмінієвих пластинок унапуск

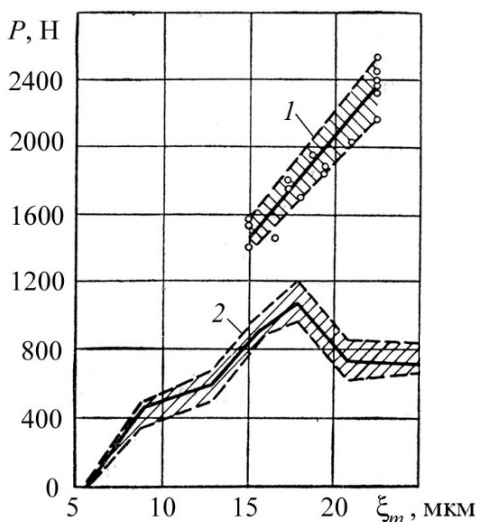


Рис. 1.27. Вплив амплітуди УЗК на руйнівне зусилля при випробуваннях на розтягування-зріз з'єднань алюмінієвих сплавів унапуск:

- 1 – Д16М товщиною 1,2 мм, стискальне зусилля 800 Н, час зварювання 2,0 с;
- 2 – АМг 6 товщиною 0,5 мм, стискальне зусилля 500 Н, час зварювання 1,5 с



## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

При УЗЗ стороннє джерело теплоти найбільш широко застосовують в електроніці для з'єднання тонких дротів, що дозволяє підвищити міцність з'єднань і скоротити час зварювання (рис. 1.28) [70]. Енергетичні характеристики теплового імпульсу і часу його дії відносно дії УЗК є додатковими параметрами режиму, які визначають якість зварювання.

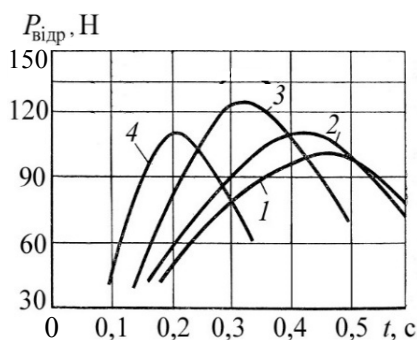


Рис. 1.28. Вплив часу дії УЗК та температури підігріву на зусилля відриву при УЗЗ алюмінієвих дротів діаметром 0,1 мм з алюмінієвими плівками на ситалі:  
1 – 20; 2 – 150; 3 – 220; 4 – 300 °C

Режими одноточкового зварювання деяких металів наведено в табл. 1.5.

**Таблиця 1.5. Режими зварювання деяких металів та руйнівні зусилля з'єднань унапуск при розтягуванні–рззі**

Матеріал	Товщина $\delta$ , мм	Режими зварювання			Середнє руйнівне зусилля $P_z$ , кН	Характер руйнування
		$P$ , Н	$t$ , с	$\xi_m$ , МКМ		
Al	0,3...0,7	200...300	0,5...1,0	14...16	0,53 ( $\delta = 0,5$ )	Виривом точки
	1,3...1,5	500...700	1,5...2,0	14...16	1,50 ( $\delta = 1,5$ )	Зрізом
AMг6	0,3...0,5	300...500	1,0...1,5	17...19	1,09 ( $\delta = 0,5$ )	Виривом точки
Д16АТ	0,3...0,7	500...800	1,0...2,0	20...22	0,59 ( $\delta = 0,4$ )	Виривом точки
Д16АМ	1,4...1,6	1100...1200	2,5...3,5	18...20	2,36 ( $\delta = 1,5$ )	Зрізом
Cu	0,3...0,6	300...700	1,5...2,0	16...20	1,13 ( $\delta = 0,5$ )	Виривом точки
	1,1...1,3	1100...1300	3,0...4,0	16...20	2,24 ( $\delta = 1,0$ )	Частковим виривом точки
BT1	0,5	800	0,5	20...22	2,00	Виривом точки
	1,0	1200	1,5	18...20	2,93	Частковим виривом точки
Zr	0,5	900	0,25	23...25	0,70	Виривом точки
BT1 + Zr	0,5 + 0,5	900	0,25	23...25	0,67	

### 1. 3. Ультразвукове зварювання

Дані табл. 1.5 отримано при УЗЗ при зварювальному наконечнику зі сферичною поверхнею радіусом 10 мм. При зварюванні алюмінію, міді та її сплавів діаметр зварної точки складав 4 мм, титану і цирконію – 3 мм. Частота УЗК складала 19,5...20,0 кГц. При малих товщинах руйнування односточкових з'єднань відбувалося шляхом викиду точки. При збільшенні товщин заготовок з'єднання руйнувалися зрізом. Міцність з'єднань при УЗЗ була вищою, ніж при контактному зварюванні.

Для УЗЗ характерні з'єднання внапуск із різним конструктивним оформленням їх елементів. Зварювання може виконуватися однією або декількома точками, безперервним швом, по замкнутому контуру. Можливе зварювання пакетом.

Діапазон зварюваних товщин обмежений зверху. Із підвищенням товщин необхідно збільшувати амплітуду УЗК, але це можливо лише до певного значення, при якому будуть відсутні руйнування від втоми та недопустимі деформації. Тому найбільш часто зварюють плоскі елементи, які знаходяться під зварюваним інструментом, товщиною від 0,3 мкм до 1,0 мм. Технічний алюміній зварюють товщиною до 2,0...2,5 мм при наявності устаткування відповідної потужності.

Товщина деталі, що знаходиться на опорі, не обмежується. Короткочасність зварювання дозволяє з'єднувати різні матеріали, які схильні до утворення інтерметалідів. Товщина останніх, звичайно, мала і не впливає на якість з'єднання.

Ультразвукове зварювання не вимагає складної підготовки деталей. Для підвищення стабільності якості з'єднань доцільно лише знежирити поверхні.

Параметри режиму УЗЗ визначаються експериментально шляхом обробки результатів механічних випробувань серії зразків, які отримують при варіації одного з параметрів та фіксованих інших. Спочатку вибирають зусилля стискування, потім час зварювання та амплітуду УЗК. Уявлення про величину цих параметрів дають наведені вище рисунки. Потужність і частота УЗК визначаються наявним устаткуванням.

Максимальну міцність з'єднань може бути досягнуто при певних значеннях частоти й амплітуди УЗК, контактної зусилля та часу зварювання. Відсутність або низька якість з'єднань обумовлюється поганим зачищенням поверхонь і недостатньою пластичною деформацією металу. Зниження міцності після оптимального значення пов'язане із частковим руйнуванням та значними деформаціями металу під зварювальним інструментом. При оптимальних параметрах режиму зварювання співвідношення сил тертя в парах "інструмент–деталь", "деталь–деталь" і "деталь–опора" повинне бути таким, щоб не було проковзування між

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

---

інструментом і опорою та деталями, налипання металу на інструмент і їх зварювання. В останньому випадку деталь включається в коливальний контур і за рахунок своєї маси змінює частоту коливальної системи, виводячи її з резонансу. Це значно погіршує умови передачі енергії до зони зварювання та скорочує ресурс роботи зварювального інструмента.

Умови виділення теплоти в зоні з'єднання можна регулювати зміною контактного зусилля. При малому зусиллі інструмент ковзає по деталі і зварювання неможливе. При надмірному зусиллі значні пластичні деформації під інструментом роблять неможливим тертя в площині "деталь–деталь".

При збільшенні діаметра зварної точки контактне зусилля та амплітуда УЗК повинні підвищуватися, що вимагає збільшення електричної потужності зварювального устаткування.

Час зварювання є найменш критичним параметром. Він вибирається тим тривалішим, чим більша товщина і твердість металу та менша потужність УЗК.

У випадку УЗЗ пластичних металів із підігрівом від стороннього джерела теплоти оптимальним є цикл із запізненням теплового імпульсу по відношенню до моменту включення УЗК. При зварюванні твердих металів доцільно давати тепловий імпульс із випередженням моменту включення УЗК, причому тривалість дії УЗК повинна бути меншою від тривалості дії теплового імпульсу. Така схема зварювання поширена в мікроелектроніці.

Ультразвукове зварювання застосовують для з'єднання багатьох металів. Найбільш легко зварюються пластичні метали (алюміній, мідь та їх сплави, срібло, нікель) як між собою, так і з твердими малопластичними матеріалами. Металічні деталі можуть зварюватися з керамікою, склом, напівпровідниковими матеріалами (кремній, германій). Успішно зварюються тугоплавкі метали: вольфрам, ніобій, тантал, цирконій, молібден. Можна зварювати заготовки через прошарок із третього металу, наприклад сталь зі сталлю через алюміній, а також метали, покриті оксидами, лаками, полімерами тощо.

Якість з'єднань при шовному зварюванні визначається тими ж параметрами, що і при точковому, лише замість часу зварювання вводиться швидкість руху деталі. Обов'язковою умовою отримання якісних з'єднань є рівність лінійних швидкостей руху зварювального ролика та опори. При правильно вибраних режимах шовного зварювання руйнівне зусилля у зварного з'єднання вище, ніж в основного металу.

### 1.3.3. Зварювальне устаткування

Устаткування для УЗЗ складається з власне зварювального обладнання та ультразвукового генератора (УЗГ), який перетворює електричну енергію промислової частоти в електричну енергію ультразвукової частоти. До енергетичних характеристик УЗГ належать: вихідна потужність, робочий діапазон частот, напруга. Генератори випускаються різних типів і можуть використовуватися для очищення деталей у рідині, інтенсифікації різних процесів, обробки металів, зварювання тощо. Вони можуть бути ламповими, напівпровідниковими, лампово-напівпровідниковими, тиристорними, інверторними. Характеристики деяких генераторів, які найбільш часто застосовуються для різних технологічних процесів, наведено в табл. 1.6.

Таблиця 1.6. Характеристики деяких генераторів для використання в технологічних процесах

Назва генератора	Параметри живлення			Вихідні параметри		
	Напруга, В	Частота, Гц	Потужність, кВт	Напруга, В	Частота, кГц	Потужність, кВт
УЗГЗ-0,4	220	50	1,1	27...220	18; 22; 44	0,4
УЗГЗ-10	380	50	13,0	360	18; 22	10,0
УЗГЗ-4	380	50	6,0	360	18; 22	4,0
УЗГ1-1	220	50	2,0	220	22	1,2
ГПЧ-4-8	380	50	6,0	360	8	4,5
ТГУ-1,2-27	380	50	2,0	110	27	1,2

Для зварювання в мікроелектроніці використовують УЗГ з потужністю в декілька десятків ват та частотою 40...66 кГц.

Власне зварювальне обладнання складається з коливальної системи, механізму стискування, системи охолодження, апаратури керування параметрами режиму зварювання та приводу обертання роликів при шовному зварюванні. До коливальної системи входять перетворювач енергії електромагнітних хвиль в енергію механічних коливань, трансформатор пружних коливань (хвилевід), зварювальний інструмент тощо.

Для зварювання використовують ультразвукові акустичні коливання, тобто механічні коливання пружного середовища, які поширюються у вигляді хвиль. *Ультразвуковими* називають коливання з діапазоном частоти 18...10<sup>6</sup> кГц. При УЗЗ зазвичай використовується діапазон частот 18...80 кГц.

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

*Генерація УЗК базується на магніострикційному або п'єзоелектричному ефектах, відкритих відповідно Джоулем у 1847 р. та Жаном і П'єром Кюрі в 1880 р.*

*П'єзоелектричний ефект полягає в тому, що неметалічні кристали змінюють свої розміри, якщо до протилежних сторін кристалів прикласти електричний потенціал. Це явище оборотне. При пружних деформаціях кристала на його гранях з'являється різниця електричних потенціалів.*

*Магніострикцією називається зміна розмірів і форми зразка з феромагнітного матеріалу під дією пронизуючого змінного магнітного потоку. Якщо змінюється об'єм зразка без зміни його форми (наприклад, при нагріванні ненамагніченого феромагнетика в точці Кюрі), то це явище називають *об'ємною магніострикцією*. Якщо при незначній зміні об'єму спостерігається зміна форми зразка і його розмірів у певному напрямку, то говорять про *лінійну* магніострикцію. Лінійна магніострикція спостерігається при дії на феромагнетик магнітного поля, нижчого від точки Кюрі. Феромагнітний матеріал змінює свої розміри синхронно зі зміною напруженості магнітного поля. Величина лінійної магніострикції складає біля  $10^{-5}$  ( $\Delta l/l \approx 10^{-3} \%$ ) і залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля. Розрізняють поздовжню магніострикцію (відносна змінна довжина зразка в напрямку дії магнітного поля) і поперечну магніострикцію (у перпендикулярному напрямку). Феромагнітні властивості мають залізо, кобальт, нікель та їхні сплави.*

*Для феромагнетиків (коефіцієнт магнітної проникності  $\mu \gg 1$ ), як і для парамагнетиків ( $\mu > 1$ ), характерна наявність власних магнітних моментів у часток (*доменів*), які їх складають. Це обумовлено спіновими магнітними моментами електронів. Джерелом феромагнетизму можуть бути некомпенсовані магнітні моменти електронів внутрішніх оболонок атома, оскільки згідно з правилом Хунда заповнення оболонок даного електронного рівня відбувається спочатку неспареними електронами і тільки потім утворюються пари електронів із протилежними спінами. Феромагнетиками можуть бути лише кристали, які містять атоми перехідних елементів із не повністю забудованими внутрішніми оболонками, хоча цього недостатньо. Наприклад, хром і марганець мають у  $3d$ -станах по п'ять електронів, але їхні кристали не мають феромагнітних властивостей. Другою умовою феромагнетизму є *обмінна взаємодія* типу "електрон–електрон" та "електрон–іон", оскільки всі "магнітні" електрони нерозрізновані. Кожний із них може входити до складу будь-якого іона ґратки.*

*Обмінна взаємодія в кристалах феромагнітних металів призводить до паралельної орієнтації спінів. Орієнтуючись певним чином, некомпен-*

пенсовані спіни можуть викликати макроскопічну намагніченість кристалів. При відсутності зовнішнього магнітного поля намагніченість мікроскопічного феромагнетика дуже мала, оскільки макроскопічний об'єм феромагнетика розбивається на мікрообласті із взаємоскомпенсованими антипаралельними векторами намагніченості. Ці області довільної намагніченості отримали назву *феромагнітних доменів*. Таке розташування векторів намагніченості забезпечує мінімальне власне магнітне поле. Чим більшою буде кількість антипаралельних доменів, на які розбивається кристал, тим меншою буде його магнітостатична енергія.

Під дією зовнішнього магнітного поля вектори намагніченості орієнтуються за цим полем. Результируюча магнітна структура залежить від напруженості зовнішнього поля та температури.

Магнітострикція під дією зовнішнього магнітного поля обумовлена, головним чином, процесами зміщення доменних границь і обертанням векторів намагніченості доменів, що призводить до зміни взаємодії між атомами ґратки і міжатомних відстаней. Ці процеси пов'язані з напрямком вектора напруженості зовнішнього магнітного поля, що призводить до зміни форми зразка вздовж поля.

Ефект магнітострикції використовують для генерації УЗК із досить високими значеннями енергії, зокрема у магнітострикційних перетворювачах для зварювання та обробки металів.

Головним елементом зварювальної установки є магнітострикційний перетворювач. Для його виготовлення застосовують чистий нікель, залізо-нікелеві, залізо-алюмінієві та залізо-кобальтові сплави, наприклад пермендюр К49Ф2 (49 % Со; 1,5...1,8 % V, решта Fe), пермендюр К65 (65 % Со, решта Fe), альфер Ю-14 (14 % Al, решта Fe). Магнітострикційне подовження цих матеріалів складає для нікелю  $3,5 \cdot 10^{-5}$ ; К49Ф2 –  $7 \cdot 10^{-5}$ ; К65 –  $9 \cdot 10^{-5}$ ; Ю-14 –  $5 \cdot 10^{-5}$ .

Магнітострикційний перетворювач виготовляється у вигляді замкнутого магнітопроводу зі штампованих пластин, наприклад пермендюру з окисною ізоляційною плівкою. Його обмотка збудження підключається до УЗГ, що є джерелом змінного струму ультразвукової частоти. Обумовлений природою магнітострикційний ефект є парним, тобто він виявляється як при прямому, так і при протилежному напрямках магнітного поля. Тому частота пружних механічних коливань у 2 рази більше від частоти змінного струму в обмотці.

Оскільки розташування векторів намагніченості в доменах забезпечує мінімальне власне магнітне поле, то в магнітопроводі створюється також постійний магнітний потік за допомогою постійного струму (потік або струм підмагнічування).

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

Магніострикційний перетворювач має також обмотку зворотного зв'язку (використовується зворотний ефект магніострикції) для автоматичного підстроювання частоти УЗГ до частоти перетворювача.

Такі перетворювачі випускаються з різними характеристиками, серед яких найважливішими є потужність і частота. Наприклад, перетворювач ПМС-15А-18 має потужність 4,5 кВт (частота 18 кГц), ПМС1-1 – 1,2 кВт (22 кГц), ПМС-27 – 0,9 кВт (27 кГц), ПМС-6-22 – 2,5 кВт (22 кГц).

Робочий діапазон частоти УЗГ визначається резонансною частотою магніострикційного перетворювача і повинен допускати регулювання частоти в межах її зміни в перетворювачі при експлуатації. Для підвищення ефективності використання енергії УЗК розроблено перетворювачі з плавним регулюванням резонансної частоти.

Зміна розмірів магніострикційних матеріалів незначна. Тому для збільшення амплітуди, швидкості і концентрації енергії УЗК та передачі їх до зони зварювання використовують трансформатори і хвилеводи пружних коливань.

Процес розповсюдження УЗК є хвильовим. Залежно від напрямку коливання часток розрізняють декілька типів хвиль. Якщо частки середовища коливаються у хвилях у напрямку їх розповсюдження, то такі хвилі називають *поздовжніми* (*хвилі розтягування-стискування*). Якщо частки середовища коливаються у хвилях перпендикулярно до напрямку їх розповсюдження, то такі хвилі називають *поперечними* (*хвилі зсуву*). У твердому тілі можуть виникати поздовжні і поперечні хвилі, у рідинах і газах – лише поздовжні.

Швидкість розповсюдження поздовжніх коливань у стрижні, діаметр якого менший від довжини хвилі, складає

$$C_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

де  $E$  і  $\rho$  – відповідно модуль пружності і густина матеріалу стрижня.

Швидкість розповсюдження поперечних хвиль визначається рівнянням

$$C_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}},$$

де  $G$  – модуль зсуву.

Швидкість розповсюдження в сталі поздовжніх хвиль звукових коливань складає 5400...5850 м/с, поперечних – 3100...3230 м/с.

### 1. 3. Ультразвукове зварювання

Довжина хвилі пов'язана зі швидкістю  $C$  її розповсюдження рівнянням

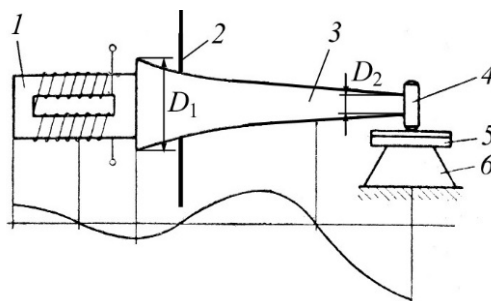
$$\lambda = \frac{C}{f}, \quad (1.4)$$

де  $f$  – частота коливань.

Із рівняння (1.4) знаходимо, що довжина поздовжньої хвилі УЗК при частоті 20 кГц у сталі дорівнює 28 см. Схему трансформації і розповсюдження хвиль у коливальній системі зварювальної машини показано на рис. 1.29.

Рис. 1.29. Схема зміни амплітуди при передачі коливань від магнітострикційного перетворювача до зварювального інструмента:

1 – магнітострикційний перетворювач; 2 – діафрагма; 3 – трансформатор коливань (хвилевід); 4 – зварювальний інструмент; 5 – деталь; 6 – опора



Між магнітострикційним перетворювачем 1 і трансформатором 3 повинен бути надійний акустичний контакт, тому їх з'єднують паянням. Трансформатор коливань одночасно виконує функції хвилеводу. Він має вигляд стрижня змінного перерізу. Залежно від форми утворюючої бокової поверхні стрижня хвилеводи поділяють на конусні, ступінчасті, експоненціальні тощо. Вони можуть бути складеними. Коефіцієнт трансформації амплітуди (також швидкості) коливань визначається рівнянням

$$K = \xi_{m2} / \xi_{m1},$$

де  $\xi_{m2}$  і  $\xi_{m1}$  – амплітуди коливань відповідно на кінці та на початку хвилеводу. Найменший коефіцієнт трансформації мають конічні хвилеводи, експоненціальні забезпечують великий коефіцієнт трансформації, а ступінчасті – найбільший.

Коефіцієнт збільшення амплітуди коливань експоненціального хвилеводу

$$K = D_1 / D_2,$$

де  $D_1, D_2$  – діаметри перерізу хвилеводу відповідно з боку магнітострикційного перетворювача і зварювального інструмента.

Звичайно для зварювання металів використовують хвилеводи з коефіцієнтом підсилення коливальної швидкості близько 5.



## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

На рис. 1.29 показано діафрагму 2, яка встановлюється у вузловій площині і служить для акустичної розв'язки коливальної системи від корпусу магнітострикційного перетворювача.

Схему ультразвукової установки для точкового зварювання показано на рис. 1.30.

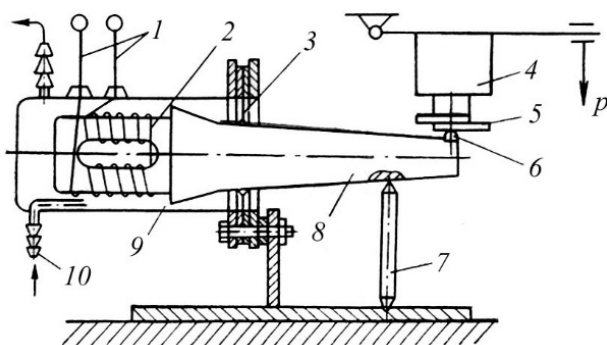


Рис. 1.30. Схема установки для точкового зварювання ультразвуком:

- 1 – живлення від УЗГ; 2 – магнітострикційний перетворювач; 3 – діафрагма;  
4 – механізм стискування; 5 – деталь; 6 – зварювальний наконечник;  
7 – маятникова опора; 8 – хвилевід; 9 – кожух водяного охолодження;  
10 – охолоджуюча вода

Магнітострикційний перетворювач 2, обмотка якого живиться струмом високої частоти від УЗГ, звичайно виготовляють із пермендіюру К-49Ф2. Механічні коливання передаються хвилеводу. Хвилевід є трансформатором коливальних швидкостей. Він передає коливання до місця зварювання, забезпечує необхідну величину коливальної швидкості і збільшення амплітуди коливань зварювального наконечника в порівнянні з амплітудою вихідних хвиль перетворювача, концентрує енергію коливань у зоні зварювання. На кінці хвилеводу є зварювальний наконечник 6 для точкового зварювання. Деталь 5 затискають між наконечником 6 і механізмом стискування 4. Зварювання відбувається при включеному магнітострикційному перетворювачі і дії певного зусилля стискування.

На якість з'єднання суттєво впливає форма зварювального наконечника. Звичайно його виготовляють у формі циліндричного стрижня з робочою поверхнею у вигляді сфери або зрізаної сфери. Рекомендується також робоча поверхня у вигляді зрізаного конуса. Вибір матеріалу наконечника залежить від зварюваних металів. Використовують сталь 45, ШХ-15, Р-18, тверді наплавлення різними електродами.

При шовному зварюванні (рис. 1.31) магнітострикційний перетворювач, хвилевід та ролик обертаються. Високочастотні коливання пере-

### 1. 3. Ультразвукове зварювання

даються хвилеводом 3 на ролик 4. Деталь 6 встановлюється між роликом 4 і притискним роликом 5.

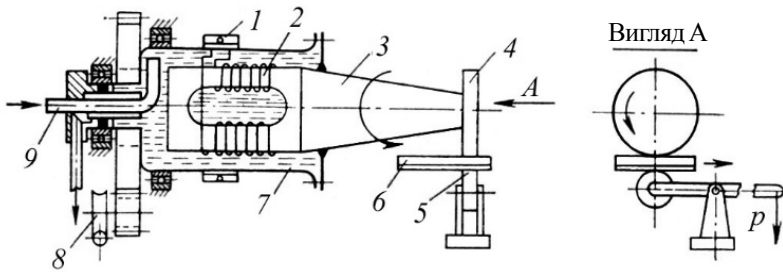


Рис. 1.31. Схема установки для шовного зварювання ультразвуком:

- 1 – живлення від УЗГ; 2 – магнітострикційний перетворювач; 3 – хвилевід;  
4 – зварювальний ролик; 5 – притискний ролик; 6 – деталь;  
7 – кожух перетворювача; 8 – привід; 9 – охолоджуюча вода

Зварювання по контуру забезпечує шви будь-якої конфігурації. У цьому випадку робочий інструмент виготовляють за формою контуру зварювання.

Незалежно від форми зварного з'єднання та опору навантаження, для забезпечення стабільності процесу зварювання механічна коливальна система повинна працювати на резонансній частоті.

Високочастотні ультразвукові генератори випускаються відповідно до стандарту, який регламентує вихідну потужність і частоту генераторів. Для зварювальних установок використовують генератори з вихідними потужностями від 0,01 до 10,0 кВт. Найчастіше частота струму складає 18, 22, 44 і 66 кГц. Характеристики деяких машин для УЗЗ наведено в табл. 1.7.

Таблиця 1.7. Технічні характеристики деяких машин для ультразвукового зварювання

Машини	Потужність, кВт (В·А)	Частота, кГц	Зусилля стискування, Н	Товщина зварюваної міді, мм	Маса машини, кг
УЗС-2	(20)	44	до 5	–	140
УЗСКН-1 (зі стороннім нагріванням)	(20)	44	0,2...10	–	215
МТУ-0,4	0,4	22	60...600	0,01...0,2	76
МТУ-1,5	1,5	22	150...1500	0,1...0,5	82
МТУ-4	4,0	18	500...5500	0,3...1,2	105

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

Для ультразвукового зварювання розроблено багато різних за призначенням установок. Установки типів МТУ-0,4, КТУ-0,1 (0,63), КТУ-1,5, ММУ-0,63, АСУ-1,5 дозволяють здійснювати зварювання великої кількості виробів [84]. Для зварювання елементів мікросхем розроблені установки ЭМ-417, ЭМ-404, УЗСКН-1, напівавтомати МС4П2-1, МС4П3-2, "Контакт-4". Машина марок ЭМ-417, УЗСКН-1, МС4П3-2 призначені для ультразвукового зварювання з підігрівом. Універсальну машину "Контакт-4" використовують для зварювання в захисному газі. Для мікроелектроніки перспективним є використання ультразвукового зварювання з досить малими амплітудами коливань зварювального наконечника, але з істотним підвищенням частоти ультразвукового генератора для забезпечення в зоні контакту необхідної потужності. Зварювання товстостінних деталей доцільно вести при більш низьких частотах ультразвукових коливань.

### *1.3.4. Особливості та сфери застосування ультразвукового зварювання*

Основною перевагою УЗЗ є можливість з'єднання *тонких* і *ультратонких* (0,3...0,5 мкм) деталей, приварювання тонких дрітків і фольги до деталей будь-якої товщини, зварювання пакетів із фольги.

Завдяки унікальній можливості зварювання мініатюрних деталей, інтегральних схем тощо ультразвукове зварювання найбільш широко застосовують у приладобудуванні, електронній та радіоелектронній техніці.

Ультразвукове зварювання проводиться без суттєвого нагрівання, що дає можливість з'єднувати метали, які при інших способах зварювання між собою схильні до утворення крихких інтерметалідних прошарків. Висока ефективність ультразвукового очищення поверхонь дозволяє виконувати зварювання плакованих та окисдованих деталей, а також покритих різними ізоляційними плівками. Для зварювання високоактивних металів створено спеціальне обладнання з газовим захистом.

Безумовними перевагами УЗЗ є низька енергоємність процесу, простота устаткування і його обслуговування. Наприклад, при контактному точковому зварюванні алюмінію товщиною 1 мм використовується машина потужністю 100...150 кВ А, а для УЗЗ аналогічного з'єднання – 2,5...5,0 кВ А, тобто достатньо машини МТУ-4.

При УЗЗ метал суттєво не змінює своїх властивостей, не забруднюється сторонніми домішками. Спосіб зварювання характеризується гарними санітарно-гігієнічними умовами праці.

Використовуючи УЗЗ, слід мати на увазі, що робота устаткування не в режимі резонансу не раціональна. Тому необхідно враховувати всі факто-

ри, які впливають на частоту системи. Налагодження устаткування на конкретний режим включає в себе регулювання струму підмагнічування, зусилля стиснення, часу зварювання. Зварювальний інструмент є складовою частиною акустичного вузла, що розраховується на певну частоту, і заміна інструмента має певні складності. Тому важливе значення має строк роботи зварювального інструмента в умовах дії УЗК та ерозії його робочої поверхні. Необхідно враховувати також деформацію поверхні зварюваних деталей під робочим інструментом.

Ультразвукові коливання широко застосовуються в промисловості також для зміцнення приповерхневого шару, зняття напружень у зварних конструкціях, зварювання пластмас тощо. За допомогою ультразвуку можна поліпшити якість металу шва при дуговому та електрошлаковому зварюванні. Обробка металу шва при кристалізації ультразвуком сприяє дегазації металу, подрібненню структури і підвищенню механічних властивостей. Перспективним є використання ультразвуку при контактному та дифузійному зварюванні. Під дією ультразвукових коливань у результаті фрагментації поверхневих шарів електричний опір контакту зростає, що підвищує ефективність використання енергії в зоні зварювання і дозволяє знизити потужність контактних машин. Сприятливий вплив ультразвуку при дифузійному зварюванні обумовлений значним підвищенням інтенсивності дифузійних процесів. У суднобудуванні ультразвук найбільш широко застосовується для контролю якості зварних з'єднань. Ультразвукові методи діагностики та контролю якості металевих конструкцій є провідними в різних галузях. В обладнанні для цих цілей використовують п'єзоелектричний ефект.

## 1.4. Зварювання тертям

### 1.4.1. Суть способу

*Зварювання тертям* (*reibschweissen; friction welding; сварка трением*) – це зварювання тиском із нагріванням металу в зоні з'єднання внаслідок тертя його поверхонь під час обертання або зворотно-поступального руху однієї поверхні відносно іншої (рис. 1.32) [21, 23, 72].

Зварювання тертям (ЗТ) застосовується при виготовленні деталей, які мають форму тіл обертання. Співвісно розташовані деталі стискаються з певним зусиллям, а одній із деталей надається обертання. При обертанні відбувається притирання торців та інтенсивне тепловиділення. Забруднення разом із розігрітим до пластичного стану металом витискаються зі стику. Після нагрівання до пластичного стану відносно переміщення деталей миттєво припиняють і стискають їх зусиллям осадки.

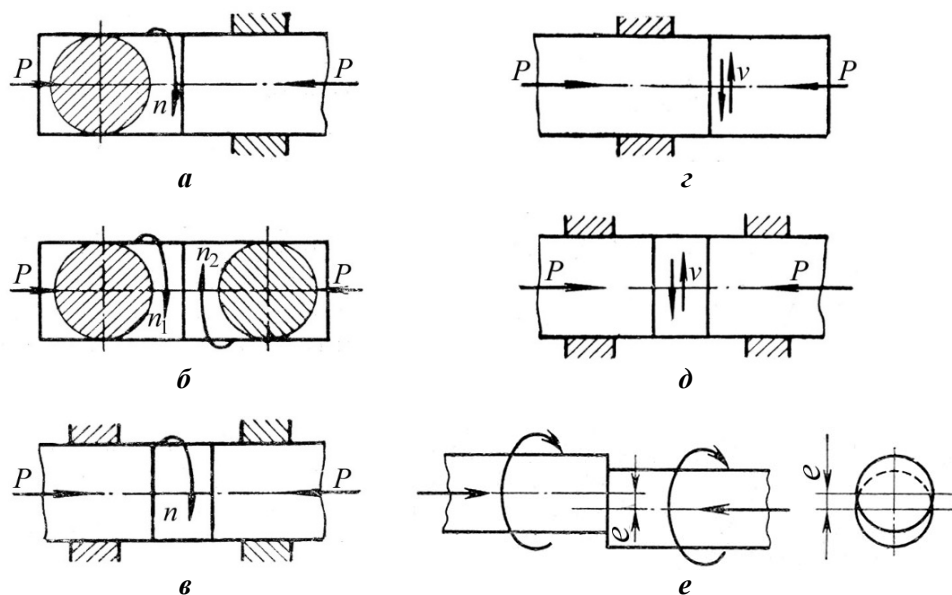


Рис. 1.32. Схеми процесів зварювання тертям:

- a* – з обертанням однієї з деталей; *б* – з обертанням двох деталей у різні сторони;  
*в* – з обертанням вставки; *г* – з вібрацією однієї з деталей;  
*д* – з вібрацією вставки; *е* – із синхронним обертанням в одну сторону двох деталей, осі яких зміщені на відстань  $e$

Можливі варіанти зварювання з обертанням у різні сторони обох деталей, з обертанням вставки між деталями, з вібротертям. Вібрацію можна передавати одній із деталей або проміжній вставці і зварювати деталі, які не мають форми тіл обертання. Деталі будь-якої форми можна зварювати також за схемою, показаною на рис. 1.32, *е*. Деталі стискають і обертають в одну сторону. Внаслідок зміщення осей між поверхнями виникає тертя.

Розроблено способи наварювання тертям із використанням обертання або вібрації присадного металу (рис. 1.33, *а, б*).

У кінці 90-х рр. ХХ ст. почало інтенсивно розвиватися **зварювання тертям із перемішуванням металу** (*friction stir welding*). Воно розроблено Британським інститутом зварювання. Схему процесу зварювання металів показано на рис. 1.33, *в*. При цьому використовується зварювальний інструмент *1* зі штирем *5* спеціальної форми довжиною на всю товщину листа. Інструмент обертається зі швидкістю до 15000 об/хв і переміщується вздовж стику. Штир *5* проникає в метал до торкання заплечиками інструмента поверхні зварюваних деталей і подрібнює метал крайок листів. Унаслідок тертя штиря і заплечиків з металом виділяється

#### 1. 4. Зварювання тертям

теплота, яка доводить подрібнений метал навколо інструмента до пластичного стану. Знаходячись між основним металом, підкладкою і заплечиками під тиском, метал спікається. Під час руху інструмента вздовж стику він огинає штир і утворює зварне з'єднання.

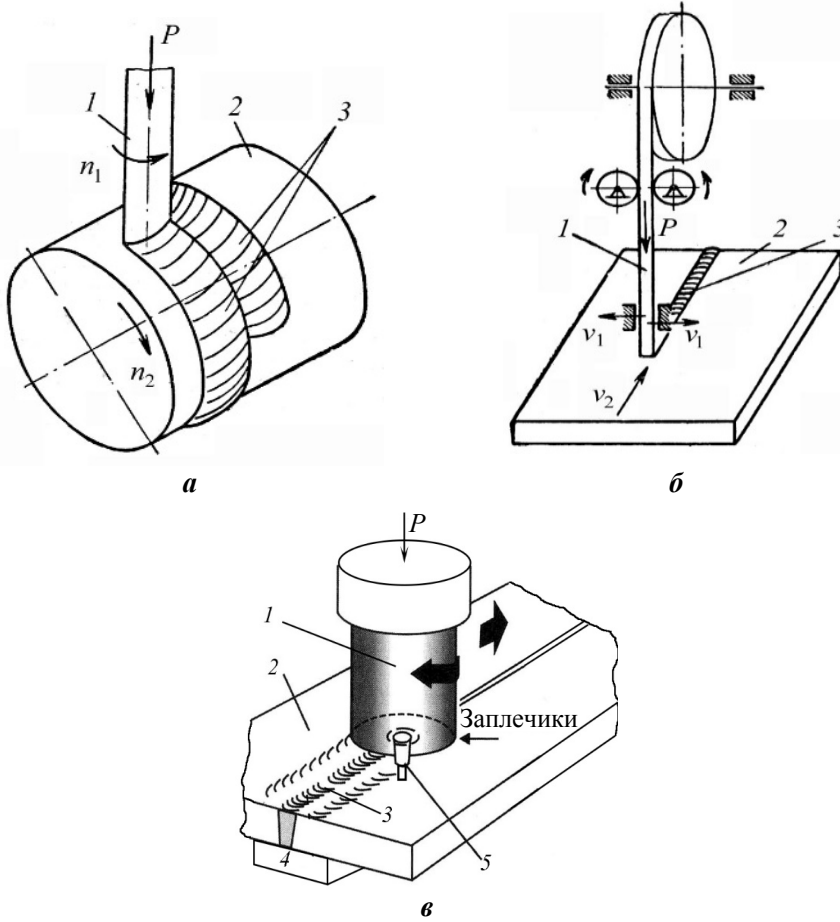


Рис. 1.33. Схеми процесів наварювання тертям з обертанням дроту (а), вібрацією дроту (б) та зварювання тертям із перемішуванням (в):

1 – дріт (а, б) або зварювальний інструмент (в); 2 – виріб; 3 – шов;  
4 – масивна підкладка; 5 – штир спеціальної форми

Розроблено також інший різновид ЗТ, що має назву *інерційного зварювання*. Його суть полягає в тому, що механічна енергія спочатку передається електродвигуном маховику для накопичення, а потім віддається маховиком у стик зварюваних деталей, де перетворюється в тепло. Це дозволяє вести зварювання на жорстких режимах. Схематично перебіг процесів інерційного зварювання та за класичною схемою показано на

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

рис. 1.34. Зварювання тертям за класичною схемою називають **конвенційним**.

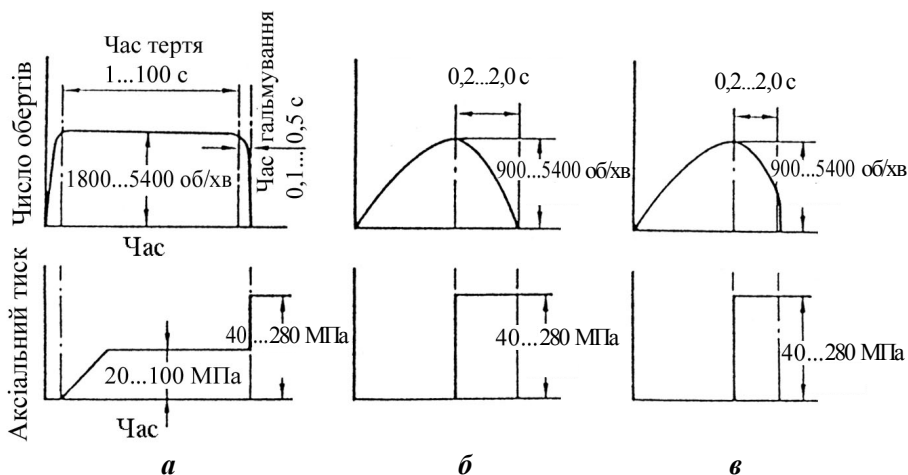


Рис. 1.34. Зміни в процесі зварювання тертям числа обертів і зусилля стискування при конвенційному (**а**) та інерційному (**б**) зварюванні з повним (**б**) і неповним (**в**) використанням накопиченої енергії

Тепловий режим при зварюванні тертям має важливе значення. Якісне з'єднання утворюється в результаті встановлення металічних зв'язків між ювенільними поверхнями деталей. Плівки різної природи на з'єднуваних поверхнях руйнуються при терті та видаляються із зони зварювання внаслідок значної пластичної деформації. Для досягнення необхідної деформації метал нагрівається під впливом теплоти, що виділяється при терті. Механічна енергія перетворюється безпосередньо в теплову локалізовано в тонких приповерхневих шарах, що нагріває метал до необхідних температур. Для сталей, залежно від режиму зварювання, ці температури складають 950...1100 °С. Метал може нагріватися тертям і до більш високих температур, але він витісняється зі стику діючим аксіальним тиском нагрівання. Після досягнення потрібної температури відносно переміщення поверхонь повинно бути якомога швидше (миттєво) зупинено. Нагріті поверхні стискаються зусиллям осадки (проковки). Об'єм тонкого приповерхневого шару, який нагрівається до температури зварювання, настільки малий, що весь цикл зварювання продовжується від декількох до 30 секунд.

Момент сил тертя та їх потужності визначаються рівняннями:

$$M = \frac{2}{3} \pi p f R^3;$$

#### 1. 4. Зварювання тертям

$$N \approx \frac{2}{3} \pi p f n R^3 \cdot 10^{-6};$$

$$N_{\text{пит}} \approx \frac{2}{3} \pi p f n R \cdot 10^{-3},$$

де  $M$  – момент сил тертя;  $N$  – повна потужність тертя;  $p$  – тиск;  $n$  – частота обертання, об/хв;  $f$  – коефіцієнт тертя;  $N_{\text{пит}}$  – середня питома потужність тертя, віднесена до номінальної площі поверхні тертя;  $R$  – радіус дії сил тертя.

Момент сил тертя в процесі зварювання змінюється (рис. 1.35). Спочатку він проходить через мінімальне, а потім – максимальне значення. На усталеній стадії він залишається постійним.

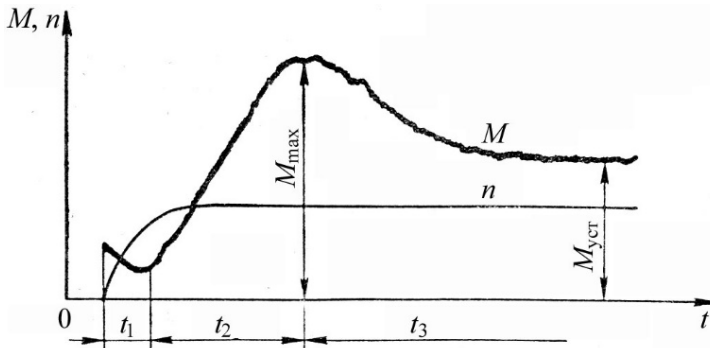


Рис. 1.35. Зміни швидкості обертання  $n$  і моменту сил тертя  $M$  при зварюванні тертям

Спочатку процес проходить при незначних температурах і характеризується сухим або граничним тертям. Невеликий пік на початку кривої відповідає тертю спокою. Перехід до стану руху супроводжується зменшенням моменту сил тертя (інтервал часу  $t_1$ ).

Швидкий ріст моменту сил тертя відповідає початку утворення між очищеними та активованими поверхнями вузлів схоплювання та їхнього руйнування. Процес схоплювання швидко розширюється по всій поверхні (інтервал часу  $t_2$ ). Ріст температури в зоні тертя призводить до зменшення опору вузлів схоплювання та усталення процесу (інтервалу часу  $t_3$ ). Кількість теплоти, яка виділяється між поверхнями, складає близько 1 % на першій фазі ( $t_1$ ), 12 % – на другій ( $t_2$ ), 87 % – на третій ( $t_3$ ). Таким чином, до температури зварювання метал нагрівається на третій фазі з деформуванням металу в зоні стику. У зв'язку з малим значенням першої фази ( $t_1$ ) на циклограмах процесу зварювання зазвичай її не показують.



## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

Зварне з'єднання утворюється після зупинки відносного переміщення деталей під дією тиску осадки (проковки), який звичайно вибирають більшим від тиску при нагріванні.

Режим процесу тертя визначає характер взаємодії поверхонь. При малих швидкостях тертя відбувається глибинний вирив частинок металу, при великих – лише малих поверхневих частинок. Тому в останньому випадку товщина теплогенеруючого шару мінімальна. Його температура зростає, хоча питомі витрати енергії на зварювання значно зменшуються (рис. 1.36).

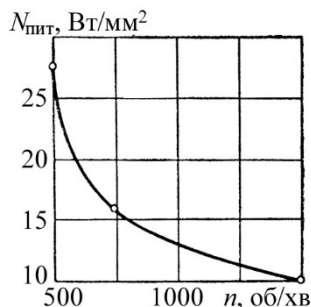


Рис. 1.36. Вплив швидкості обертання стрижня на питому потужність виділення теплоти при зварюванні низьковуглецевої сталі діаметром 20 мм при тиску нагрівання  $p_n = 50$  МПа,  $\Delta l = 5$  мм

Необхідною умовою утворення якісного з'єднання є пластична деформація металу в зоні стику, яку називають *величиною осадки* ( $\Delta l$ ).

Під дією температури і тиску в зоні зварювання витіснений метал утворює "комірець", який захищає зварювані поверхні від зовнішнього середовища (рис. 1.37). Його розміри та форма, як і ширина зони термічного впливу, залежать від зварюваних металів та параметрів режиму зварювання.

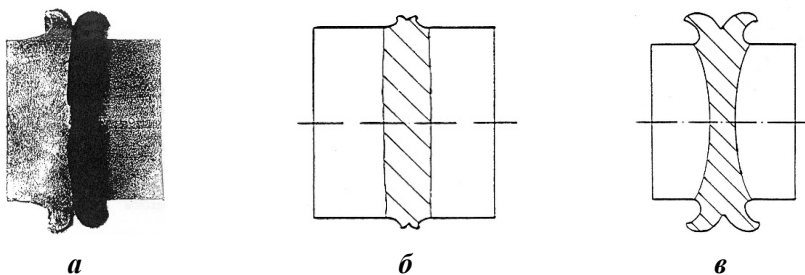


Рис. 1.37. Макрошліф (а) і схеми утворення "комірця" при малих тиску і часу нагрівання (б) та більших тиску і часу нагрівання (в)

Витіснення металу зі стику в радіальному напрямку у вигляді комірця сприяє винесенню зруйнованих при терті оксидів. При зварюванні одноіменних металів одного діаметра деформації обох деталей однакові, при зварюванні різноіменних – різні. При зварюванні металів із різко

#### 1. 4. Зварювання тертям

відмінними механічними властивостями, наприклад сталі з алюмінієм, одна з деталей (у даному випадку сталева) може зовсім не деформуватися.

Зварювання тертям за схемою рис. 1.32,*е* називають **орбітальним зварюванням тертям**. У цьому випадку тертя між стиснутими поверхнями виникає лише тоді, коли осі заготовок не збігаються. Тоді кожна точка на торці однієї заготовки робить певні кола відносно відповідної точки на торці другої заготовки з кутовою швидкістю, що дорівнює кутовій швидкості заготовок. Отже, потужність виділення теплоти на всій поверхні тертя постійна і визначається величиною тиску та швидкістю відносного переміщення поверхонь  $v$ , яка знаходиться за рівнянням

$$v = \frac{\pi en}{60},$$

де  $e$  – величина зміщення осей, м;  $n$  – число обертів деталей на хвилину. Числове значення швидкості  $v$  знаходиться в інтервалі значень для конвенційного зварювання тертям (0,5...3,0 м/с). Виділення теплоти закінчується при суміщенні осей заготовок, що обертаються. При цьому вони стискаються зусиллям проковки.

При інерційному зварюванні використовується запас кінетичної енергії маховика, який розганяється електродвигуном. Величина кінетичної енергії визначається за рівнянням

$$E_k = \frac{j\omega^2}{2},$$

де  $j$  – момент інерції маховика;  $\omega$  – його кутова швидкість руху.

Ця енергія повністю (див. рис. 1.34,*б*) або частково (*в*) іде на подолання сил тертя. Якщо вона використовується повністю, то час гальмування (зварювання) визначається рівнянням

$$t_{зв} = k \frac{j\omega}{M}, \quad (1.5)$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності.

##### 1.4.2. Технологія зварювання

Основними параметрами режиму зварювання тертям є частота обертання, тиск і час нагрівання, тиск проковування (осадки) і величина осадки металу.

Типову циклограму процесу зварювання тертям показано на рис. 1.38, де виділено дві укрупнені фази – нагрівання ( $t_1$ ) і проковки ( $t_2$ ).

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

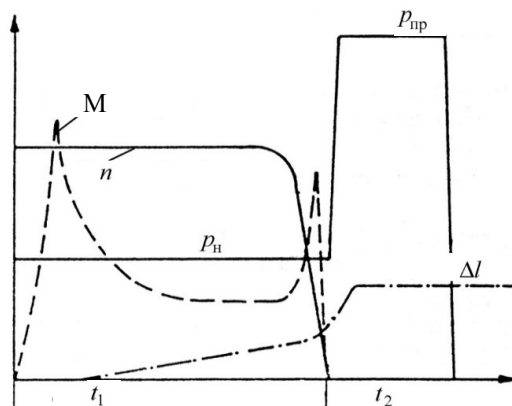


Рис. 1.38. Циклограма процесу зварювання тертям:  
 $P_{пр}$  – тиск проковки;  $t_1$  – фаза тертя;  $t_2$  – фаза осадки

Дослідження показали, що у початковий момент тертя, коли температура по перерізу деталі однакова, тиск  $p$  розподіляється по поверхні рівномірно. Тоді максимальне виділення теплоти і ріст температури проходять на периферії поверхні тертя, де швидкості максимальні. Оскільки з підвищенням температури опір металу пластичній деформації падає, то тиск перерозподіляється. Він знижується на периферійних та зростає на центральних ділянках. Також уповільнюється виділення теплоти на периферійних ділянках. Такий перерозподіл тиску і теплопровідність вирівнюють температуру після розігрівання стрижнів на певну глибину по обидві сторони від стику.

Частота обертання може змінюватися в широкому діапазоні. Найбільш часто зварювання ведуть при частоті обертання (1000...2000 об/хв). Тиск проковування вибирається значно більшим (у декілька разів) від умовної границі плинності металу при температурах зварювання (900...1000 °С). Тиск нагрівання може бути рівним тиску проковування, однак для зменшення потужності приводу зварювальної машини, зносу поверхонь при нагріванні і припусків на зварювання тиск нагрівання вибирають таким, щоб дорівнював 0,2...0,6 тиску проковування. Час нагрівання залежить від частоти обертання та тиску нагрівання і визначає величину зносу деталей при нагріванні. При терті нагрівається тонкий шар металу, тому час нагрівання складає секунди або десятки секунд. При цьому температура сталі в зоні зварювання може досягати 950...1300 °С. Величина осадки при зварюванні тертям складає 3...6 мм, а іноді і більше. Для зварювання тертям дуже важливою є можливість практично миттєвої зупинки взаємного переміщення зварюваних деталей. Зусилля проковки прикладається в момент зупинки відносного переміщення деталей. Режими зварювання тертям деяких металів наведено в табл. 1.8.

1. 4. Зварювання тертям

Таблиця 1.8. Режими зварювання деяких металів

Метал	d, мм	Фаза нагрівання		Фаза зварювання		n, об/хв	Δl, мм
		P <sub>нр</sub> , МПа	t <sub>1</sub> , с	P <sub>зв</sub> , МПа	t <sub>2</sub> , с		
Низьковуглецеві та низьколеговані сталі, зокрема: 20	20	20...100	3...100	40...250	2...10	750...5000	2...12
	20	50	10	50	5	1500	3
	10	40	3	40	2	3000	2
	20X	40	25	40	5	3000	4
25Г2С	22	45	8	45	2	1500	4
	9,5	65	6	180	3	1250	6
30ХГСА	10	100	5	100	2	1500	4
Високолеговані сталі, зокрема: 1Х18Н10Т	20	40...100	6...10	120...400	2...5	750...5000	4...8
	9,5	65...100	6...10	120...300	2...3	1250...3000	5...10
Х18Н12Т	9,5	65	5	220	3	1250	6
Алюміній АД1	20	8	3	8	1...2	3000	7
	20	10...30	0,1...4,0	30...80	2...5	2000...4000	7...14
	40	30	10	30	1...2	0	30
	40	35	28	150	1...2	760	20
Латунь Л62	16	33	3	33	1...2	3000	7
1Х18Н9Т + сталь 45	20	80	3	80	1...2	3000	7
Сталь Р18 + сталь 45Х	10...22	80...120	2...8	180...220	1...2	1900...2100	3...4
Латунь ЛМ-58-2 + сталь 20	30	25	6...8	25	1...2	1500	7
Алюміній АД1 + Ст3	40	50	3...4	50	1...2	760	13...15
Алюміній АД1 + мідь М1	32	30	3...4	200	1...2	1000	18

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

Дані у табл. 1.8 мають великі розбіжності, що свідчить про можливість різних варіантів вибору тиску нагрівання та осадки. Час нагрівання здебільшого на перевищує 10 с, а величина осадки складає 3...7 мм. Кожному значенню тиску нагрівання і частоті обертання заготовки відповідають свої оптимальні значення часу та величини зносу заготовки. Процес зварювання можна контролювати за часом нагрівання або величиною осадки. При виборі режиму зварювання спочатку визначають тиск проковки і співвідношення з ним тиску нагрівання, потім за величиною зносу час нагрівання і за величиною осадки уточнюють значення тисків. Швидкість обертання заготовки визначається можливостями машини. Якщо є можливість змінювати швидкість у широкому інтервалі, то розпочинати досліди слід із середніх значень (1500...2000 об/хв).

Наші дослідження зварювання тертям сталей різних структурних класів показали, що при випробуваннях на розтягування статичним навантаженням з'єднання, отримані при оптимальних режимах, руйнуються поза стиком.

Зварювали однофазну хромонікелеву аустенітну сталь з 12% Ni і 2,5% Mo, низьколеговану мартенситну сталь із невеликою кількістю аустеніту, карбідно-аустенітну сталь зі зміцненою нітридною фазою (0,4% N) та низьколеговану феритно-перлітну сталь. Усі сталі зварювалися у вигляді стрижнів діаметром 9,5 мм, що отримані прокатуванням. Тому вони мали витягнуту вздовж осі текстуру. Зварювання виконувалося при частоті обертання 1250 об/хв, тиску нагрівання 40...140 МПа, тиску проковки 180...260 МПа. Для всіх сталей оптимальний режим нагрівання виявився однаковим:  $p_n = 65$  МПа,  $t_n = 4...6$  с. Тиск проковки вибрано 180 МПа для феритно-перлітної та аустенітної сталей, 220 МПа – для низьколегованої мартенситної сталі і 260 МПа – для карбідно-аустенітної сталі з нітридним зміцненням та найбільш стабільною структурою. Величина осадки складала 5...8 мм. Мартенситна сталь поставлялася після термічної обробки (гартування від 1000 °С у маслі і відпуск при 650 °С) зі структурою сорбіту. Границя міцності зварних з'єднань цієї сталі складала 95 % відносно основного металу, але після вказаної термічної обробки перевищувала показники сталі в стані постачання. Зварні з'єднання різнорідних сталей за границею міцності не поступалися слабшій з них, але ударна в'язкість зварних з'єднань була нижчою від в'язкості основного металу.

При зварюванні катаних стрижнів у зоні деформації волокна змінюють свій напрям від перпендикулярного до паралельного стику, що зменшує ударну в'язкість. Вигин волокон металу в зоні зварювання яскраво видно на рис. 1.39.

#### 1. 4. Зварювання тертям

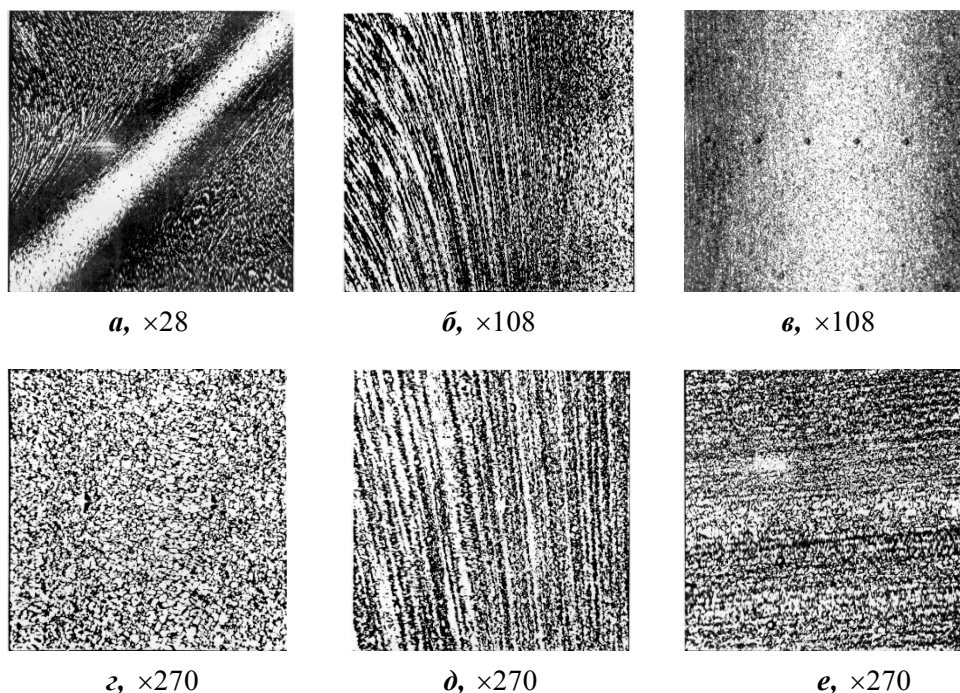


Рис. 1.39. Мікроструктура зварного з'єднання карбідно-аустенітної сталі з нітридним зміцненням:

загальний вигляд (*a*), зона вигину волокон (*б*, *д*),  
зона стику (*в*, *г*), основний метал (*е*)

В основному металі (див. рис. 1.39,*е*) волокна розташовані вздовж осі стрижня, а поблизу стику не лише змінюють свій напрям на перпендикулярній осі (*б*), але, як показало вивчення поверхні руйнування зразків, також закручуються по спіралі. У зоні стику (див. рис. 1.39,*а*) видно білу смугу, в якій метал нагрівався до температури розчинення зміцнювальних фаз. У ній метал втратив початкову текстуру, але у зв'язку з короткочасністю процесу зварювання зміцнювальні фази лише почали розчинятися. Вони є бар'єрами для руху границь зерен, і тому метал зберігає дрібнозернисту структуру. Витримка зразків зварних з'єднань 15 хвилин при 1175 °С забезпечила їм ударну в'язкість на рівні в'язкості основного металу.

Ширина білої смуги залежить від параметрів режиму зварювання, але в першу чергу від тиску проковки. При надмірному тиску смуга зовсім відсутня, що свідчить про утворення з'єднання між більш холодними прошарками заготовок. При цьому міцність з'єднань може знижуватися.

Дослідження структури та мікротвердості металу показали, що зі збільшенням тиску проковки навколошовна зона звужується. При зварюванні

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

мартенситної сталі в результаті швидкого охолодження спостерігається гартування металу в тих зонах, де метал нагрівся вище температури гартування. Мікроструктура в зоні з'єднання поступово змінюється від сорбітної в основному металі до бейнітно-мартенситної в стику, а мікротвердість зростає від 3200 до 5500 МПа. При зварюванні аустенітної сталі твердість змінюється мало, дещо підвищуючись у зоні стику зі збільшенням тиску проковки.

На рис. 1.40 показано зміну мікротвердості і концентрації елементів при зварюванні аустенітної і низьколегованої сталей. При випробуваннях зразки руйнувалися поза стиком.

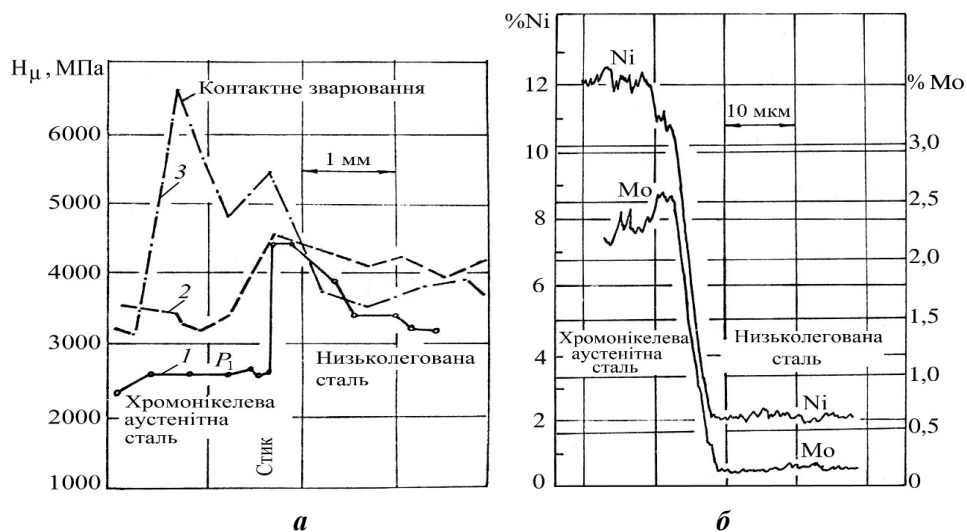


Рис. 1.40. Мікротвердість металу (а) і розподіл нікелю та молібдену (б) в зоні стику при зварюванні високолегованої аустенітної та низьколегованої сталей:

1 – зварювання тертям при  $p_{\text{пр}} = 260$  МПа; 2 – зварювання тертям при  $p_{\text{пр}} = 385$  МПа; 3 – контактне стикове зварювання

Для порівняння на рис. 1.40,а наведено дані щодо зварювання стиковим контактним зварюванням (лінія 3) сталей аналогічного призначення для виготовлення випускних клапанів двигунів. Шток клапана виготовляють із низьколегованої сталі, що гартується, а головка клапана – з високолегованої аустенітної сталі. На відміну від контактного зварювання, при зварюванні тертям твердий і крихкий прошарок із боку аустенітної сталі не утворюється. Його відсутність підтверджується результатами досліджень мікроструктури та розподілу елементів. Для зварювання при  $n = 1250$  об/хв рекомендовано тиск нагрівання 65 МПа, час нагрівання 5 с, тиск проковки 260 МПа, що призводить до величини

#### 1. 4. Зварювання тертям

осадки 7 мм. Швидкоплинність процесу не допускає інтенсивного розвитку дифузійних процесів. У зоні з'єднання метал має дрібнозернисту структуру.

Зварювання тертям проходить під дією інтенсивного локалізованого джерела теплоти, значної пластичної деформації і при надійному захисті зварюваних поверхонь від повітря.

Особливістю інерційного ЗТ є малий час нагрівання, що позитивно впливає на зварювання різнорідних металів, які утворюють інтерметаліди, але негативно – на зварювання сталей, які гартуються.

*Режим зварювання визначають накопичена енергія маховика і момент сил тертя, тобто початкова кутова швидкість і зусилля стиснення деталей.*

Слід відзначити, що при інерційному зварюванні з'єднання утворюється при поступовому зменшенні відносного руху поверхонь під дією сил їх тертя, тобто в умовах дії осьових і тангенціальних напружень. Тому час та можливості формування інтерметалідних прошарків різнорідними металами дуже обмежені, що визначає переваги інерційного зварювання перед традиційною схемою.

Підготовка торцевих поверхонь до зварювання тертям може виконуватися найрізноманітнішими способами: різанням пилюкою, наждачним кругом, на токарному верстаті тощо з протиранням чистою ганчіркою. Не допускається наявність на них окалини. Основною вимогою підготовки деталей є забезпечення перпендикулярності її поверхні тертя до осі обертання. Для деталей з одного металу допускається непаралельність поверхонь  $5 \dots 7^\circ$ , для різнорідних металів коливання торця не повинне перевищувати 0,2 мм.

Зварювання деталей з однаковими розмірами перерізу та одного матеріалу не викликає труднощів, але при зварюванні стрижня або труби з плоскою деталлю спостерігається асиметрія температурного поля (рис. 1.41, *а*). Тому в цьому випадку на деталі з плоскою поверхнею проточують виступ або канавку, як показано на рис. 1.41, *б–г*.

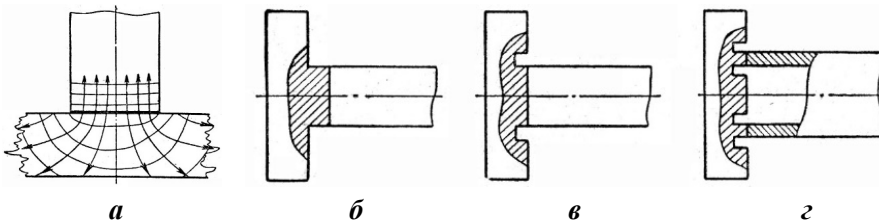


Рис. 1.41. Температурне поле в Т-подібному з'єднанні (*а*) та підготовка деталі з плоскою поверхнею при зварюванні її зі стрижнем (*б, в*) і трубою (*г*)



## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

При зварюванні деталей із різнорідних металів підготовка поверхні більш твердого з них, який мало деформується, має жорсткі вимоги за допуском. Крім того, використовують попереднє підігрівання торця деталі з більш твердого матеріалу, спеціальні оправки для деталі з більш пластичного металу або збільшують на 15...20 % діаметр останньої. Довжина виходу деталі із затискачів складає 0,5...1,5 її діаметра. Менше значення відноситься до малих діаметрів і пластичних металів.

Накопичений досвід зварювання тертям показує, що найчастіше вибирають  $p_n = 40 \dots 80$  МПа, а  $p_{пр} / p_n = 2 \dots 3$ . При інерційному зварюванні  $p_n = p_{пр}$ , а час зварювання визначається за рівнянням (1.5).

Останнім часом аналогічна інерційному зварюванню технологія для різнорідних металів розроблена щодо традиційного устаткування з модернізацією останнього [37], але при цьому  $p_{пр} > p_n$ .

Для конвенційного зварювання тертям характерне швидке примусове гальмування відносного руху деталей. Це сприяє утворенню якісних з'єднань однорідних металів, але може негативно впливати при з'єднанні металів, які утворюють крихкі прошарки. Їх товщина залежить від тиску проковки. Вона зменшується зі збільшенням тиску і змінюється по радіусу заготовки, але, наприклад, при конвенційному зварюванні міді з алюмінієм уникнути утворення інтерметалідів досить важко.

В ЕЗ ім. Є.О. Патона під керівництвом академіка НАН України С.І. Кучука-Яценка розроблено спосіб зварювання тертям, при якому регулюється гальмування відносного руху заготовок, що забезпечує стабільні високі показники міцності і пластичності з'єднань різнорідних металів [37]. Циклограму такого процесу показано на рис. 1.42.

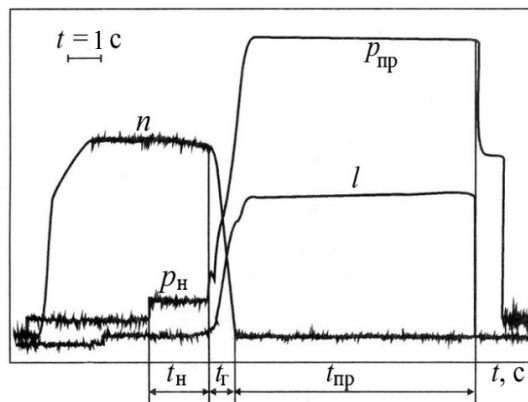


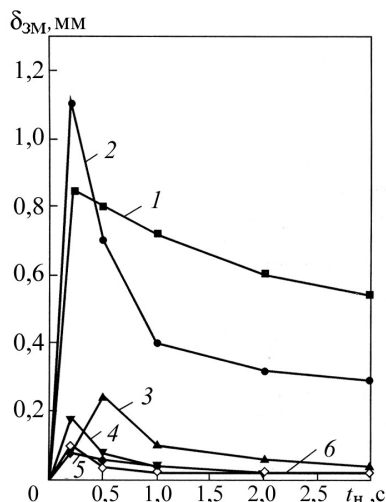
Рис. 1.42. Циклограма зварювання тертям різнорідних металів із регулюванням гальмування відносного руху заготовок:  $p_n, p_{пр}$  – тиски відповідно нагрівання і проковки;  $l$  – осадка заготовок;  $t_n, t_г, t_{пр}$  – час відповідно нагрівання, гальмування і проковки

#### 1. 4. Зварювання тертям

Особливістю ЗТ різнорідних матеріалів є асиметрія температурного і деформаційного полів, що призводить до зміщення поверхні тертя в заготовку з меншим опором зсуву при температурі зварювання, оскільки опір зсуву по площині початкового контакту уже на першій стадії ЗТ більший, хоча з'єднання поверхонь не є досконалим. Якість такого з'єднання надалі зростає завдяки високотемпературній деформації металу в зоні стику. При зварюванні різнорідних металів, які утворюють інтерметаліди, збільшення часу їх контактування в нагрітому стані, навпаки, призводить до незворотних шкідливих змін складу і структури металу.

Установлено, що при зварюванні алюмінію з міддю та сталями вже на початку тертя відбувається схоплювання поверхонь. У парі алюміній–мідь воно проходить практично миттєво після дотику поверхонь заготовок, що обертаються. Унаслідок цього поверхня тертя зміщується в алюмінієву заготовку. Величина зміщення залежить від швидкості руху та величини тиску (рис. 1.43).

Рис. 1.43. Залежність величини зміщення поверхні тертя  $\delta_{зм}$  від часу нагрівання  $t_n$  при зварюванні міді з алюмінієм:  
1 –  $v = 0,75$  м/с,  $p_n = 25$  МПа; 2 –  $0,75$  м/с; 50 МПа;  
3 –  $1,5$  м/с; 25 МПа; 4 –  $1,5$  м/с; 50 МПа;  
5 –  $2,5$  м/с; 25 МПа; 6 –  $2,5$  м/с; 50 МПа



Зміщення поверхні тертя знаходили шляхом розведення заготовок при нагріванні без зупинки їх руху та визначення товщини шару алюмінію, перенесеного на поверхню міді. Встановлено, що величина зміщення залежить від параметрів режиму зварювання, але вона спочатку збільшується, а потім зменшується і набуває усталеної величини. У діапазоні зміни тиску нагрівання 25...50 МПа зміщення поверхні тертя в алюмінієву заготовку при зменшенні колдової швидкості від 2,5 до 0,75 м/с збільшується від 0,2 до 1,1 мм для пари алюміній АД1–мідь і від 0,02 до 0,4 мм для пари алюміній АД1–сталь 12Х18Н10Т. Усталена величина зміщення поверхні тертя при колдовій швидкості 2,5 м/с досягається за

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

час нагрівання 0,5... 1,0 с. Подальше збільшення швидкості не впливає на характер термодформаційних процесів у зоні стику.

Зміщення поверхні тертя на початковій стадії нагрівання пояснюється зміцнюючою дією більш міцного металу після схоплювання поверхонь і деформаційним зміцненням в одному напрямку та зменшенням міцності металу з підвищенням температури – у протилежному. На початку тертя переважає процес зміцнення, і поверхня тертя (поверхня з мінімальним опором зсуву) переміщується в алюміній. Руйнування проходить із вивороченням глибинних шарів алюмінію. При збільшенні часу нагрівання, внаслідок росту температури, переважає процес зменшення міцності металу, і поверхня тертя рухається до поверхні початкового контакту, однак, унаслідок зміцнюючої дії більш твердої (мідної чи сталевий) поверхні, вони не збігаються. На усталеній стадії біля більш твердої поверхні існує тонкий прошарок деформованого алюмінію, який ускладнює активацію цієї поверхні і витіснення інтерметалідів із зони стику.

З'єднання алюмінію з міддю або сталлю утворюються по поверхні тертя і поверхні початкового контакту. Умови на цих поверхнях різні. Більш високі температури та інтенсивні тангенціальні й осьові деформації гарантують з'єднання алюмінію по поверхні тертя. По поверхні початкового контакту більш міцний метал схоплюється з алюмінієвим прошарком, який перешкоджає розвитку процесів активації поверхонь початкового контакту.

Для активації процесів формування з'єднань по поверхні початкового контакту при зварюванні тертям за схемою з різким гальмуванням ідуть по шляху збільшення колової швидкості руху та тиску нагрівання, але це призводить до інтенсифікації процесу утворення інтерметалідів.

Розроблений спосіб зварювання тертям із регульованим гальмуванням (циклограма рис. 1.42), унаслідок одночасної дії при проковці стискаючих осьових та тангенціальних напружень, забезпечує різке збільшення швидкості осадки й інтенсифікацію процесу зсувної деформації по поверхні початкового контакту. Швидкість осадки при цьому збільшується в 5–7 разів порівняно зі стадією нагрівання. Основними факторами, які впливають на формування інтерметалідного прошарку, є тривалість стадії нагрівання, величина і швидкість осьової та тангенціальної деформації на стадії проковки. Для зварювання міді з алюмінієм вибрано оптимальний режим:  $p_n = 60$  МПа;  $v = 1,9$  м/с;  $t_n = 0,4$  с;  $p_{np} = 200$  МПа;  $t_r = 0,7$  с;  $t_{np} = 6$  с. Термодформаційні умови формування з'єднань аналогічні умовам при інерційному зварюванні.

Розроблений спосіб зварювання гарантує відсутність інтерметалідних прошарків і стабільність якості зварювання. Для його реалізації на

серійному устаткуванні проведена модернізація, що забезпечує програмування динаміки гальмування на заключній стадії зварювання. Наприклад, на серійній машині МСТ-2001 вдається зварювати мідь з алюмінієм при діаметрах заготовок до 35 мм (тиск проковки не менше 200 МПа). Після відповідної модернізації на цій машині забезпечується якісне зварювання міді з алюмінієм при діаметрах заготовок 16...55 мм.

### 1.4.3. Зварювання тертям з перемішуванням

Цей спосіб використовується, в основному, для зварювання стикових, кутових, таврових та інших з'єднань алюмінію та його сплавів (рис. 1.44). Суть зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП) полягає в спіканні нагрітого при подрібненні металу за рахунок тертя (*stir welding*).

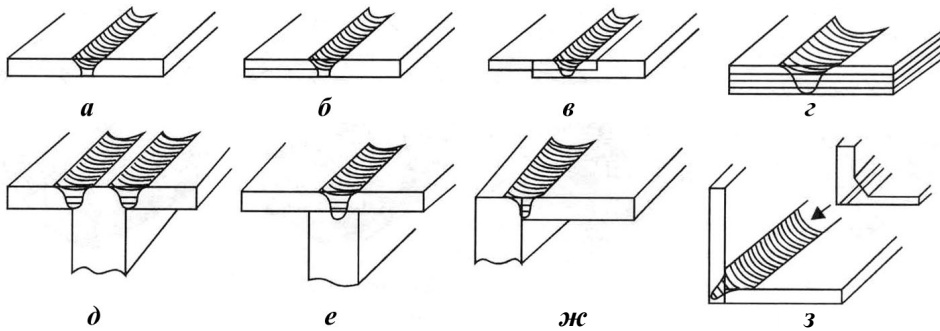


Рис. 1.44. Типи з'єднань, виконані ЗТП:

*а* – стикове; *б* – внапуск-стикове; *в* – внапуск; *г* – багатощарове внапуск;  
*д* – двопрорідне таврове; *е* – таврове прорідне; *ж, з* – кутові

Основними параметрами режиму ЗТП є: частота обертання, зусилля притискування, зусилля та швидкість переміщення інструмента (швидкість зварювання), кут нахилу інструмента відносно деталі. Важливими є розміри і форма інструмента. Враховуються також умови тертя залежно від матеріалів інструменту і деталі та напруження плинину матеріалу заготовок при температурі деформації.

Взаємозв'язок швидкості зварювання і частоти обертання інструмента видно з рис. 1.45.

Дефекти в зварних швах пов'язані з надмірним або недостатнім перемішуванням металу. Як видно з рис. 1.45, сплав 6000 має широкий діапазон значень швидкостей зварювання і частот обертання інструмента.

Формування металу шва в значній мірі визначається формою інструмента. Для покращення перемішування металу в кореневій частині зі зворотного боку листів роблять невеликий скіс крайок (рис. 1.46,*а*) або

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

установлюють підкладки з канавкою (**б**), в яку витісняється метал, формуючи невеликий валик. Він після зварювання видаляється механічною обробкою, забезпечуючи високу якість кореневої частини з'єднань. Під інструментом товщина металу зменшується на 0,1...0,2 мм, але, якщо це важливо, то рекомендують створювати в зоні стику потовщення металу (див. рис. 1.46,**в**) шириною, близькою до діаметра запlechиків. Воно має важливе значення при наявності в стику зазору, який може складати до 1,25 мм при товщині листа 12 мм.

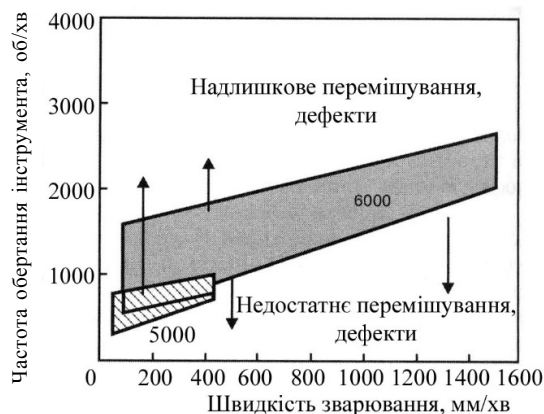


Рис. 1.45. Співвідношення швидкості зварювання і частоти обертання інструмента, яке дозволяє отримати якісні з'єднання алюмінієвих сплавів 5000 і 6000 товщиною 5 мм

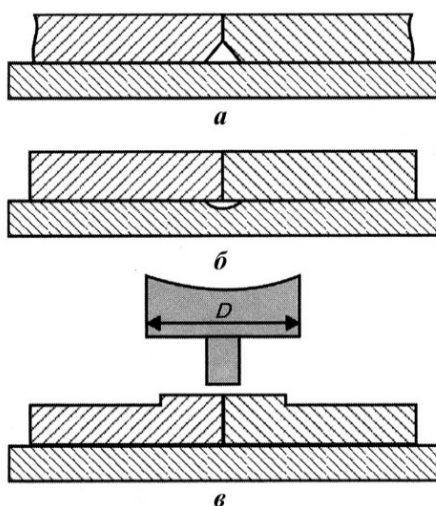


Рис. 1.46. Підготовка зварюваних крайків зі скосом у кореневій частині (**а**), підкладка з канавкою (**б**) та потовщення крайків (**в**)

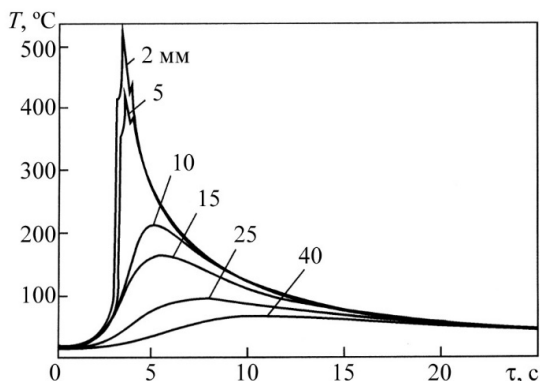
Дослідження термічних циклів зварювання показали, що ЗТП характеризується досить високими градієнтами температур (рис. 1.47). Максимальна температура (близько 500 °С) існує дуже короткий час. При температурах 200...300 °С також метал перебуває не більше 2...3 с. Термічний цикл показано при ЗТП сплаву АА6063 товщиною 4 мм зі швидкістю 0,5 м/хв. Аналогічний характер розподілу температури виявлено при зварюванні сплавів 7075 Т651 і 6N01 системи Al-Si-Mg.

У мікроструктурній будові зварюваного з'єднання виділяють декілька зон. Першою з боку основного ме-

#### 1. 4. Зварювання тертям

талу є зона, в якій метал залишається недеформованим, змінюючи свою структуру лише під дією температури. Її називають *зоною термічного впливу*. Далі, ближче до центру, знаходиться зона, в якій відбуваються значні пластичні деформації і нагрівання. Її називають *зоною термомеханічного впливу* (ЗТМВ). За цією зоною розташовано ядро з'єднання.

Рис. 1.47. Термічний цикл при ЗТП алюмінієвого сплаву АА6063 при різних відстанях від центру шва



У ЗТВ твердість металу знижується внаслідок перестаріння та зменшення щільності дислокацій. У ЗТМВ проходить вигин витягнутих зерен основного металу, часткова рекристалізація, старіння і відпал, що призводить до мінімальної твердості металу. Під впливом високих температур можливе розчинення зміцнюючих фаз. Мікроструктура ядра складається з рівновісних зерен, розмір яких не перевищує 10 мкм. Твердість металу ядра вища, ніж ЗТМВ, але нижча, ніж основного металу в термічно зміцненому стані. Твердість сплаву 5083 у відпаленому стані дещо нижча, ніж твердість ядра. Твердість металу з'єднань різних сплавів товщиною 6,4 мм показано на рис. 1.48.

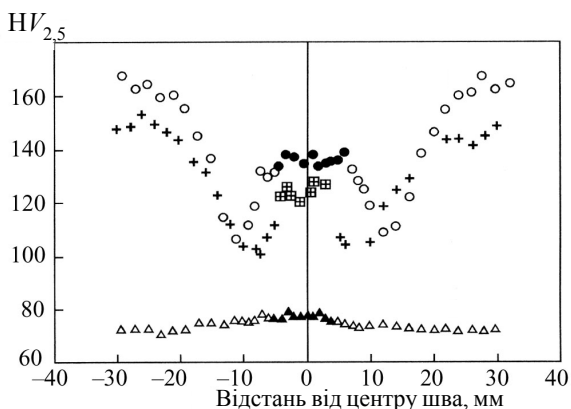


Рис. 1.48. Розподіл твердості металу перпендикулярно до осі шва після ЗТП сплавів:  
△ – 5083-0; + – 2014AT6; ○ – 7075 T7351

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

Механічні властивості з'єднань після ЗТП дещо нижчі від показників основного металу, але перевищують аналогічні характеристики з'єднань, отриманих іншими способами. Оскільки зварювання відбувається в твердому стані, то рівень зварювальних напружень нижчий, а структура металу значно дрібніша, ніж при будь-якому способі зварювання плавленням. Результати випробувань зварних з'єднань після ЗТП на втому також кращі, ніж при зварюванні плавленням плавким або неплавким електродом. Знеміцнення основного металу в ЗТВ менше, ніж при зварюванні плавленням. При цьому рівень дефектності швів при ЗТП майже на порядок менший, ніж при зварюванні плавленням.

### *1.4.4. Зварювальне устаткування*

Машини для зварювання тертям мають досить високі осьові зусилля і швидкість обертання та повинні забезпечувати швидкий запуск і миттєву зупинку руху деталей відносно одна одної. Основними вузлами машин є: досить потужна станина, привід обертання, механізми гальмування й осьового стискування, затискні механізми для установки деталей, апаратура керування процесом. Перша в світі машина для зварювання тертям МСТ-1 побудована в 1957 р. Пізніше на основі цієї машини була розроблена серія машин МСТ (МСТ-23, МСТ-35, МСТ-41 тощо) різної потужності. Машина МСТ-35 дозволяє зварювати деталі діаметром до 36 мм, МСТ-51 – до 70 мм. Створено автомати МСТА-31, МСТА-32 для зварювання тертям. Як виняток, зварювання тертям можна виконувати на переобладнаних токарних або свердлильних верстатах, але вони не розраховані на великі осьові навантаження.

Схеми обладнання для зварювання тертям показано на рис. 1.49.

Машини для зварювання, як правило, одношвидкісні. Швидкість вибирається такою, щоб в інтервалі певного діапазону діаметрів деталей можна було забезпечити якісне з'єднання, змінюючи інші параметри. Для зупинки відносного руху заготовок використовують зупинку всіх рухомих частин за допомогою фрикційного гальма або реверс електродвигуна подачею протиструму та від'єднання шпинделя від електродвигуна за допомогою муфти та застосування фрикційного гальма (для потужних машин). Характеристики деяких машин наведено в табл. 1.9.

Зусилля стискування заготовок забезпечують пневматичні (до 50 МН), пневмогідрравлічні (50...100 МН) або гідрравлічні (більше 100 МН) приводи. Для затиснення заготовок звичайно використовують самоцентрувальні пристрої з примусовим затисненням під дією аксіального зусилля.

#### 1. 4. Зварювання тертям

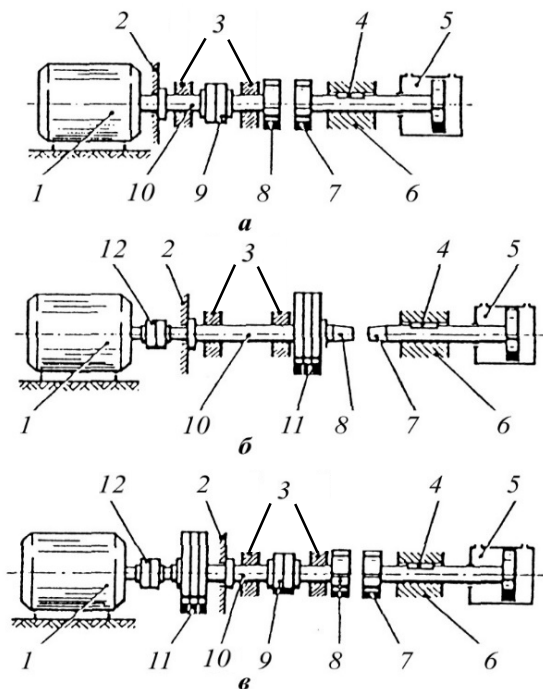


Рис. 1.49. Схеми машин для ЗТ за традиційною схемою (а) та інерційного зварювання з використанням повної накопиченої енергії (б) та її частини (в):

- 1 – електродвигун; 2, 3 – упорний та радіальний підшипники відповідно;  
 4 – клин; 5 – гідроциліндр; 6 – спрямовуючий пристрій;  
 7 – затискний пристрій; 8 – затискний пристрій, який обертається;  
 9 – муфта гальмування шпинделя; 10 – шпindel; 11 – маховик;  
 12 – муфта зчеплення

Таблиця 1.9. Технічні характеристики деяких машин МСТ для ЗТ

Показники	МСТ-23	МСТ-35	МСТ-41	МСТ-51
Потужність, кВт	10	22	40	75
Частота обертання, об/хв	1500	1000	750	500
Осьове зусилля, МН	5	10	20	40
Діаметр заготовок, мм:	50	100	200	400
мінімальний	10	16	20	32
максимальний	25	36	50	70

Машини поділяють за типорозмірами: до 3 кВт – нульовий (діаметр заготовок до 10 мм); до 10 кВт – перший (8...25 мм); до 20 кВт – другий (20...40 мм); до 60 кВт – третій (35...60 мм) і машини спеціального призначення.



## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

Устаткування для ЗТП має спеціальне призначення. Воно створюється для конструкцій певних розмірів і форм. Одну з таких установок для зварювання паливного бака ракети "Delta" показано на рис. 1.50.

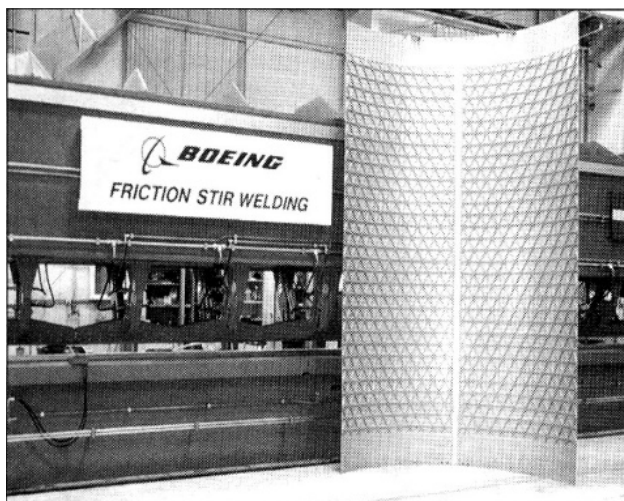


Рис. 1.50. Установа для ЗТП і секція паливного бака ракети "Delta" з поздовжнім швом

Устаткування для ЗТП складається з приводів обертання і вертикального переміщення зварювального інструмента, приводу переміщення в напрямі зварювання, потужної станини і пристроїв для закріплення зварюваних деталей у складеному стані.

Важливою деталлю установок для ЗТП є зварювальний інструмент, від якого залежить формування шва. Штир інструмента може мати різні форми. Деякі варіанти виготовлення інструмента показано на рис. 1.51.

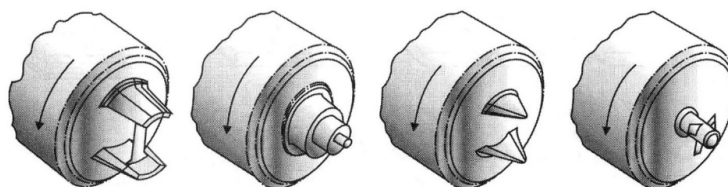


Рис. 1.51. Варіанти конструктивного виконання зварювального інструмента для ЗТП

Штирі можуть мати різьбову поверхню, поверхню з декількома виступами, поперечними та подовжніми надрізами. Створено інструмент, який дозволяє регулювати в процесі зварювання довжину штиря і діаметр заплечиків (рис. 1.52, *а, б*).

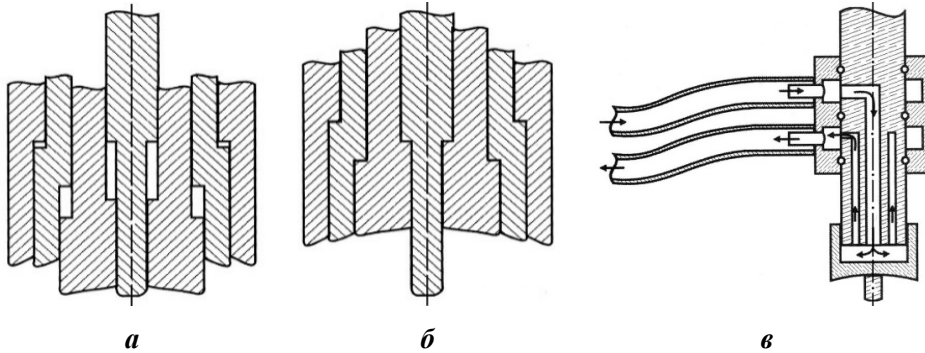


Рис. 1.52. Схеми зварювального інструмента з регулюванням довжини штиря і мінімальним (а) або максимальним (б) діаметрами заплечиків та з водяним охолодженням (в)

Програмування процесу зварювання зі зміною довжини штиря від нуля до товщини зварюваних заготовок дозволяє поступово виходити на повне проварювання металу, а потім на завершення процесу без утворення отвору. Для надійного притискування заплечиків до поверхні металу використовують пружинні пристрої. Для запобігання налипанню металу на інструмент останній охолоджується повітрям або водою (див. рис. 1.52,в).

Основним розробником і виробником промислового устаткування для ЗТП є шведська фірма "ESAB". Перша установка була виготовлена для Норвегії (фірма "Marine Aluminium"). Установка дозволяє зварювати листи товщиною від 1,6 до 15 мм при максимальних розмірах 16×6 м. До квітня 2000 р. було виконано близько 200 км швів без дефектів. Установки цієї фірми використовуються на фірмі "Boeing" для зварювання подовжніх і кільцевих швів паливних баків ракети "Дельта" при товщині заготовок 22,22 мм. Деякі установки мають обладнання для ультразвукового контролю якості з'єднання в процесі зварювання. Британським інститутом зварювання розроблено установки серії FW. Наприклад, установка FW-20 призначена для зварювання товщин 1,2...12,0 мм при швидкості до 2,6 м/хв та максимальній частоті обертання інструмента 15000 об/хв. Установка FW-14 потужністю 22 кВт призначена для зварювання товщин 5...50 мм (100 мм при зварюванні з двох боків) при швидкості до 1,0 м/хв.

Устаткування для зварювання тертям порівняно складне і дороге коштує, але висока продуктивність процесу забезпечує йому високу економічну ефективність.

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

### 1.4.5. Особливості та сфери застосування зварювання тертям

Цей спосіб зварювання успішно застосовується для з'єднання деталей, що мають форму тіл обертання або хоча б одна з них такої форми. Наприклад, спосіб широко застосовують при виготовленні інструмента, що має форму тіл обертання (свердел, різьбових калібрів тощо), клапанів двигунів, багатьох круглих деталей ступінчастого по довжині профілю або однакового діаметра, але з різних матеріалів.

На рис. 1.53 показано випускний клапан двигуна внутрішнього згорання, який за старою технологією випускався суцільноштампованим із високолегованої хромонікелевої сталі. Головка клапана працює в умовах високих температур і корозійної дії продуктів згорання палива, а шток клапана – в умовах тертя та інтенсивного зносу. Тому для старої технології характерні значні витрати високолегованої сталі та неможливість забезпечення однією маркою сталі оптимальних експлуатаційних властивостей у різних умовах.

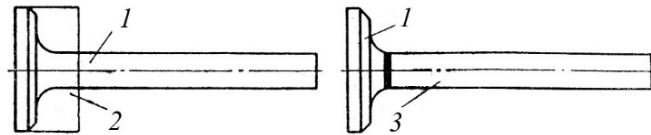


Рис. 1.53. Випускний клапан двигуна, що виготовлявся за старою технологією (а) та з використанням зварювання тертям (б):

1 – високолегована хромонікелева сталь; 2 – заготовка;  
3 – шток із низьколегованої гартованої сталі

Оптимальним є використання високолегованої хромонікелевої аустенітної та низьколегованої сталі із застосуванням зварювання тертям. З рис. 1.40,а видно переваги зварювання тертям перед контактним зварюванням за якостями зварного з'єднання. На рис. 1.54 показано значно менші витрати електроенергії при зварюванні тертям. Причому ці переваги зварювання тертям різко зростають при збільшенні діаметра заготовок.

*Перевагами зварювання тертям* перед іншими способами зварювання є: високі продуктивність та енергетичні показники процесу, якість і стабільність властивостей зварних з'єднань, простота механізації й автоматизації, відсутність шкідливих газових виділень, світлового ультрафіолетового випромінювання, розбризкування гарячого металу, незалежність якості зварних з'єднань від чистоти поверхні. До поверхонь не пред'являються високі вимоги щодо забруднення й чистоти обробки. Підготовка зварюваних поверхонь може бути виконана будь-яким ме-

#### 1. 4. Зварювання тертям

ханічним способом, наприклад на токарному, фрезерному, шліфувальному обладнанні. Зварювання тертям дозволяє одержувати міцні і надійні з'єднання різнойменних металів і сплавів.

Перевагами ЗТП є: низькі рівні зварювальних деформацій і дефектності з'єднань, можливість отримання безпористих швів на будь-якому алюмінієвому сплаві, зварювання в будь-якому просторовому положенні, з'єднання алюмінієвих сплавів із високою схильністю до утворення гарячих тріщин при зварюванні плавленням, досягнення високої міцності з'єднань термічно зміцнених сплавів, збереження властивостей метастабільних і композитних сплавів, зварювання великогабаритних конструкцій.

До недоліків зварювання тертям відносять деяку громіздкість устаткування, обмеження його застосування за формою і розмірами деталей, тобто це не є універсальний спосіб зварювання. Зварювати тертям деталі суцільного перетину діаметром менше 6 мм недоцільно. Викривлення в зоні стику волокон металу, отриманого прокатуванням, може знижувати працездатність в умовах динамічних навантажень.

До недоліків ЗТП можна віднести: необхідність потужних підкладок та надійного закріплення на них зварюваних заготовок, вузьку спеціалізацію устаткування, обмеження в застосуванні способу зварювання в портативному варіанті.

Зварювання тертям використовується на підприємствах машинобудування, верстатобудування, електротехнічної промисловості, на тракторних та автомобільних заводах, заводах сільськогосподарських машин, інструментальних, трубних та інших виробництвах.

Перспективними галузями застосування ЗТП є суднобудування (палубні надбудови, перебірки, секції корпусу), авіабудування та аерокосмічна промисловість (елементи фюзеляжу, крила, паливні та криогенні баки, корпуси ракет), залізничний транспорт і метро (вагони), автомобільна промисловість (рами, диски), будівельна індустрія (трубопроводи, мости) тощо.

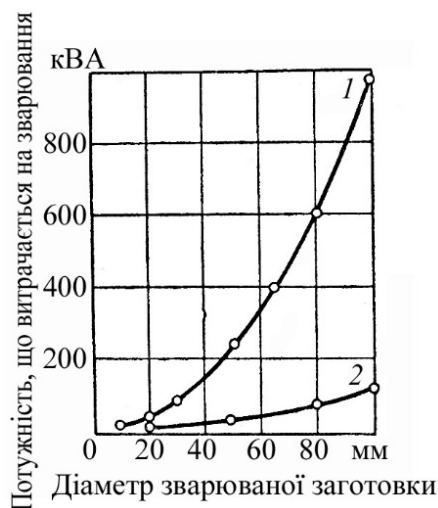


Рис. 1.54. Залежність потужності, що витрачається на зварювання, від діаметра заготовок:

- 1 – контактне стикове зварювання;
- 2 – зварювання тертям

## 1.5. Високочастотне зварювання

### 1.5.1. Суть способу

Високочастотне зварювання (ВЧЗ) або зварювання струмами високої частоти (*hochfrequenzschweissen; high-frequency welding або high-frequency resistance (pressure) welding; высокочастотная сварка*) – це зварювання тиском, плавленням або тиском з оплавленням крайок, при якому поверхні, що підлягають з'єднанню, нагріваються до зварювальних температур за допомогою струмів високої частоти [86].

Нагрівання металу струмами високої частоти (СВЧ) ґрунтується на законах електромагнітної індукції і повного струму та ефектів поверхневого, близькості, кільцевого, впливу магнітопроводів і мідних екранів на розподіл електричного струму в провіднику.

При протіканні постійного струму через плоску металеву шину прямокутного перерізу розподіл струму по перерізу буде рівномірним. Густина струму  $\vec{j}$  буде однаковою в будь-якому елементі шини і дорівнюватиме добутку питомої електропровідності  $\gamma$  матеріалу шини на напруженість електричного поля  $\vec{E}$ :  $\vec{j} = \gamma \vec{E}$ . А теплова енергія, що виділяється в шині за законом Ленца–Джоуля, буде рівномірно розподілена в об'ємі шини. Якщо через шину пропустити змінний струм із частотою  $f$ , то, крім електрорушійної сили (ЕРС) джерела живлення, у шині будуть наводитися зустрічні ЕРС індукції, які за законом Ленца спрямовані проти дії зовнішнього джерела і є найбільш сильними всередині шини. У результаті взаємодії електрорушійних сил відповідно до закону повного струму електричне поле у внутрішніх частинах шини буде послаблено і струм по перерізу буде розподілений нерівномірно. Більша частина струму буде протікати через приповерхневі шари, що й обумовлює поверхневий ефект.

Поверхневий ефект полягає в тому, що густина струму високої частоти максимальна на поверхні тіла і мінімальна в центрі тіла. Струм протікає ніби по тонкому приповерхневому шару. Глибину, на якій густина струму знижується в 2,718 разу у порівнянні з її значенням на поверхні, називають *глибиною проникнення струму*. Збільшення густини струму від центру до поверхні провідника відбувається за експоненціальним законом. Чим вище частота струму, електропровідність і магнітна проникність, тим меншою буде глибина проникнення струму:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \gamma}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}} = k \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}},$$

## 1. 5. Високочастотне зварювання

де  $\rho$  – питомий електричний опір;  $\mu$  – відносна магнітна проникність;  $f$  – частота струму;  $k$  – коефіцієнт пропорційності;  $\gamma$  – питома електропровідність.

Вплив частоти струмів на глибину їх проникнення показано на рис. 1.55.

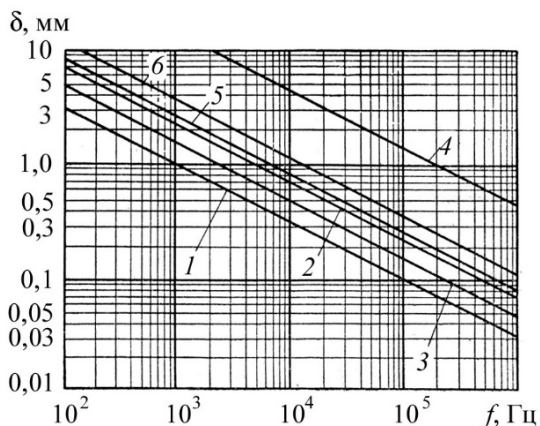


Рис. 1.55. Вплив частоти на глибину проникнення струмів для різних металів:

1 – сталь, 20 °С,  $\mu = 40$ ; 2 – мідь, 15 °С; 3 – сталь, 20 °С,  $\mu = 16$ ;  
4 – сталь, 840 °С; 5 – алюміній, 20 °С; 6 – мідь, 400 °С

Приблизно глибину проникнення струму при нагріванні можна обчислювати за такими рівняннями:

для міді

$$\delta \approx \frac{70}{\sqrt{f}} \text{ мм};$$

для магнітної сталі при температурі вище від точки магнітних перетворень

$$\delta \approx \frac{500}{\sqrt{f}} \text{ мм};$$

для магнітної сталі при температурі нижче від точки магнітних перетворень

$$\delta \approx \frac{32,5}{\sqrt{f}} \text{ мм}.$$

Поверхневий ефект забезпечує високу густину струму в поверхневих шарах, концентрацію в них, виділення енергії і швидке нагрівання металу.

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

---

Магнітна проникність парамагнітних і діамагнітних матеріалів від напруженості магнітного поля не залежить. Магнітна проникність феромагнітних матеріалів залежить від їх температури та напруженості магнітного поля. Відносна магнітна проникність феромагнітних матеріалів із ростом обох параметрів зменшується і при переході через точку Кюрі дорівнює одиниці. Тому густина струму і густина теплової потужності змінюються при нагріванні. Вище точки Кюрі глибина проникнення струму збільшується приблизно в 15 разів. При збільшенні частоти глибина проникнення струму зменшується. Тому при нагріванні масивних деталей до високої температури по всьому перерізу вибирають менші частоти, а при необхідності нагрівання лише тонкого поверхневого шару – високі. При досить високих частотах (440...500 кГц) можна вважати, що теплота виділяється в надзвичайно тонкому шарі, тобто відбувається суто поверхнєве нагрівання. Завдяки високій концентрації енергії час нагрівання поверхні до високих температур, у тому числі і до температури плавлення, дуже малий і може складати частки секунди, чому сприяє також ефект близькості.

*Ефект близькості* проявляється при протіканні змінного струму в системі провідників. Розглянемо дві паралельні струмопровідні шини. Припустимо, що струми в шинах у будь-який момент часу спрямовані протилежно один одному (рис. 1.56,*а*).

У цьому випадку магнітні потоки від обох струмів між шинами мають один напрямок і складаються, а на зовнішніх боках провідників спрямовані зустрічно і послабляються. Таким чином, напруженість магнітного поля між провідниками збільшується, а зовні провідників – зменшується. Індуктовані струми, які взаємно наводять провідники, на внутрішніх сторонах підсилюють струм від джерела. На ділянках із найбільшою напруженістю магнітного поля (магнітний потік проходить не тільки по повітрю, але й по тілу шин) існує найбільша густина струму. Тому густина струму на внутрішніх, звернених одна до одної поверхнях, більша, ніж на зовнішніх. При яскраво вираженому поверхневому ефекті струм проходить по внутрішніх сторонах шин. Аналогічний розподіл струмів у шинах існує, якщо по одній шині протікає струм від джерела електроенергії, а по іншій – індуктований струм. Цей ефект використовують при нагріванні зовнішньої поверхні деталі охоплюючим кільцевим індуктором.

У випадку однакового напрямку струмів у шинах (див. рис. 1.56,*б*) напруженість магнітного поля між шинами зменшується, а поза шинами збільшується. Густина струму на внутрішній стороні шини буде меншою, ніж на зовнішній. При яскраво вираженому поверхневому ефекті в цьому

## 1. 5. Високочастотне зварювання

випадку струм практично буде проходити по тонкому шару із зовнішньої сторони кожної шини, що використовують при нагріванні внутрішньої поверхні деталі індуктором всередині деталі.

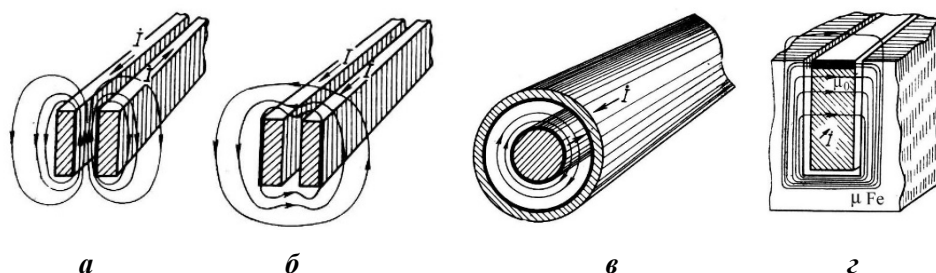


Рис. 1.56. Ефект близькості в паралельних провідниках і вплив магнітопроводу на розподіл струму в провіднику:

- a* – протилежно спрямовані струми в плоских шинах;
- б* – однаково спрямовані струми в плоских шинах;
- в* – протилежно спрямовані струми в коаксіальних провідниках;
- г* – провідник із магнітопроводом

Ефект близькості сприяє ще більшій концентрації енергії в поверхневих шарах металу, який нагрівається. Він проявляється тим сильніше, чим меншою є відстань між провідниками і вищою частота струму.

На рис. 1.56, *в* показано випадок протікання струмів зустрічного напрямку по коаксіально розташованим циліндру і трубі. У цьому випадку струм проходить по зовнішній поверхні циліндра і внутрішній поверхні труби. Ефект близькості не змінює активного опору провідників.

На розподіл струму в провіднику суттєво впливає наявність магнітопроводу та мідного екрану. Розглянемо мідний провідник прямокутного перерізу зі змінним струмом у пазі магнітопроводу з пластин заліза або фериту (див. рис. 1.56, *г*). У цьому випадку провідник із трьох сторін оточений феромагнітним матеріалом із великим питомим електричним опором. Магнітна проникність заліза набагато вища, ніж міді або повітря. Тому нижче дна паза весь магнітний потік буде проходити в залізі. При такому розподілі магнітного потоку в нижній частині провідника, яка лежить на дні паза, буде наводитися більша ЕРС, ніж у верхній, де напруженість магнітного поля менша. У результаті сумарна густина струму в верхній частині провідника буде більшою, ніж у нижній. Ця нерівномірність зростає зі збільшенням глибини паза і частоти струму, який проходить по провіднику. З достатньою для практики точністю можна вважати, що майже весь струм буде стягнутий до відкритої поверхні провідника. Цим прийомом користуються для концентрації теплоти



## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

в потрібних місцях і підвищення ефективності нагрівального пристрою. Оскільки в магнітопроводі виділяється значна кількість теплоти, його потрібно практично завжди охолоджувати водою.

Таким чином, *при високочастотному нагріванні теплова енергія виділяється безпосередньо в масі металу, а наявність поверхневого ефекту та ефекту близькості, застосування магнітопроводу забезпечують концентрацію енергії в потрібних місцях виробу, його швидке нагрівання в зоні зварювання і високу ефективність методу нагрівання.* Нагрівання проходить однаково як на повітрі, так і у вакуумі. Тому воно широко застосовується у вакуумних технологіях.

При ВЧЗ для передачі енергії від генератора до виробу застосовують два способи: *контактний (кондуктивний) та індукційний.*

При *контактному способі* на відстані 30...200 мм від місця зварювання поверхонь на них накладають контакти, до яких від високочастотного генератора підводиться струм високої частоти, зазвичай радіочастоти (більше 60 кГц). Схему радіочастотного зварювання труб показано на рис. 1.57.

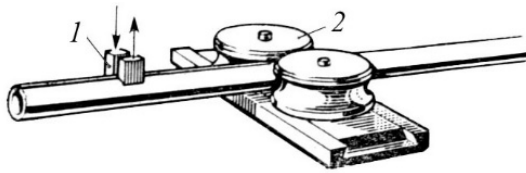


Рис. 1.57. Схema радіочастотного зварювання труб із контактним підведенням і автоконцентрацією струму в точці сходження крайок:  
1 – струмопровід; 2 – механізм стискування

Заготовка труби зі щілиною між кромками встановлюється в механізм стискування і до труби підводиться СВЧ. Унаслідок поверхневого ефекту та ефекту близькості найбільша частина струму тече вздовж торцевих поверхонь крайок і концентрується в місці їх сходження, що призводить практично до миттєвого нагрівання.

Частина струму замикається по периметру всередині труби. Цей струм можна зменшити, розташувавши всередині трубної заготовки магнітопровід. Для підведення струму розроблено спеціальні зварювальні пристрої, в яких використовують ковзні контакти або контактні ролики. В обох випадках контактні елементи працюють у важких умовах. Тому їх виготовляють із бронзи, вольфраму або молібдену.

*Індукційне нагрівання* здійснюють за допомогою спеціального пристрою – індуктора. Найпростішим індуктором є виток або котушка з декількох витків, зігнутих із мідної шини або трубки (рис. 1.58). Обов'язковим є інтенсивне охолодження індуктора водою.

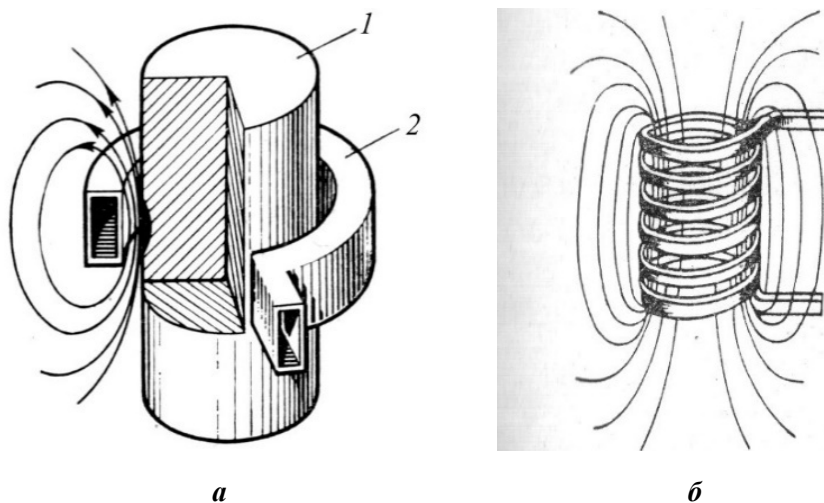


Рис. 1.58. Кільцевий або котушковий ефект одновиткового (а) та багатовиткового (б) індуктора:

1 – деталь; 2 – індуктор

При протіканні змінного струму через індуктор навколо нього виникає магнітне поле. У середині кільця напруженість магнітного поля збільшується, і струм концентрується на внутрішній поверхні провідника. Проявляється так званий *кільцевий* або *котушковий ефект*. Якщо помістити всередині індуктора металеву деталь, то змінний магнітний потік індуктора викличе в ній індуктований струм. Унаслідок поверхневого ефекту та ефекту близькості цей струм буде сконцентрований біля зовнішньої поверхні деталі і забезпечить її нагрівання. За допомогою індуктора нагрівання проводиться в заданій області. Чим меншим є повітряний зазор між індуктором і деталлю, тим більший коефіцієнт корисної дії (ККД) індуктора.

Підвищенню ККД індуктора сприяє наявність магнітопроводу 4, показаного на рис. 1.59. У конструкціях індукторів на середній частоті іноді використовують *мідні екрани*. Мідь належить до діаманітних матеріалів, відносна магнітна проникність яких трохи менша одиниці. Під дією магнітного поля в екрані наводиться струм, фаза якого відрізняється від первинного струму на  $180^\circ$ . Тому під екраном електричне поле та нагрівання значно послаблюються.

Схему високочастотного зварювання труб з індукційним нагріванням показано на рис. 1.59. Застосування нагрівання з автоконцентрацією струму (див. рис. 1.59,в) дозволяє одержати більш високу концентрацію енергії, ніж при контактному і дуговому зварюванні. Ширина ЗТВ складає 0,10...0,15 мм.

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

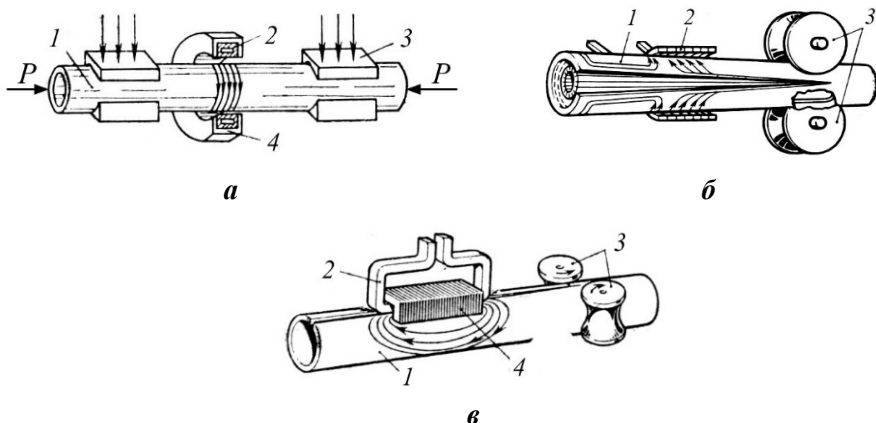


Рис. 1.59. Схеми високочастотного зварювання труб з індукційним нагріванням:

- а* – поперечне стикове зварювання; *б* – поздовжнє стикове зварювання;  
*в* – поздовжнє стикове зварювання з автоконцентрацією струму;
- 1 – труба, що зварюється; 2 – індуктор;  
3 – пристрій для стискання крайок; 4 – магнітопровід

### 1.5.2. Технологія зварювання

Процеси високочастотного зварювання можна розділити на три групи [86]: 1) зварювання плавленням (без тиску); 2) зварювання тиском з оплавленням; 3) зварювання тиском без оплавлення. Зварювання плавленням застосовується для торцевих з'єднань або з'єднань із відбортовкою при товщинах 0,3...1,5 мм. Торцеві або відбортовані крайки розплавляються за допомогою індуктора. Швидкість нагрівання 250...8000 °C/с. Обов'язковим є застосування захисного середовища.

Зварювання тиском без оплавлення звичайно також виконується із застосуванням захисту металу. Швидкість нагрівання при цьому способі не перевищує 400 °C/с, осадка складає 2,5...6,0 мм, швидкість осадки – 20 мм/с.

Найбільш широко застосовується ЗТ з оплавленням. Розплавлений метал видаляється із зони з'єднання при осадці. Зварне з'єднання утворюється між поверхнями, які знаходяться у твердому стані. Швидкість нагрівання досягає  $150 \cdot 10^3$  °C/с, осадка складає 0,15...1,5 мм, швидкість осадки – 2000 мм/с.

Зварювання СВЧ широко застосовують при виробництві труб, для чого створено спеціальні стани з різними схемами нагрівання (див. рис. 1.57 та 1.59). Зварюють прямошовні труби *малого* (10...219 мм), *середнього* (220...530 мм) та *великого* (більше 530 мм) діаметрів.

## 1. 5. Високочастотне зварювання

Основними параметрами режиму ВЧЗ є: температура, тиск, величина осадки, швидкість зварювання (руху заготовки). Використовуються генератори частотою 2,5...500 кГц. Частота струму узгоджується з товщиною металу. Швидкість руху трубної заготовки узгоджується з потужністю зварювального пристрою. Для зменшення потужності зварювального пристрою при індукційному нагріванні необхідно прагнути, щоб зазор між трубною заготовкою та індуктором був якомога меншим (1,5...2,0 мм). Це підвищує ККД індуктора.

**Радіочастотне зварювання** (див. рис. 1.57, частота 60...500 кГц) може виконуватися **в трьох режимах** [86].

1. При підході до стискуючих валків крайки нагріваються до температури 1300...1400 °С. У точці сходження крайки нагріваються додатково, але не розплавляються. Зварювання виконується у пластичному стані при тиску 50 МПа.

2. При підході до стискуючих валків крайки нагріваються до температури, близької до температури плавлення, а в точці сходження оплавляються. При тиску 20...30 МПа рідкий метал разом з утвореними оксидами легко видаляється зі стику.

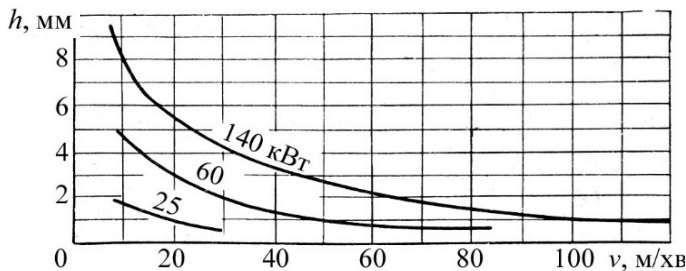
3. При підході до точки сходження крайки розплавляються, а в точці сходження метал перегрівається. При тиску 20 МПа оксиди видаляються разом із рідким металом.

При зварюванні труб із низьковуглецевих сталей можна використовувати будь-який режим, але переважає другий. При зварюванні труб із нержавіючих сталей та алюмінієвих сплавів, що утворюють тугоплавкі оксиди, застосовують третій режим.

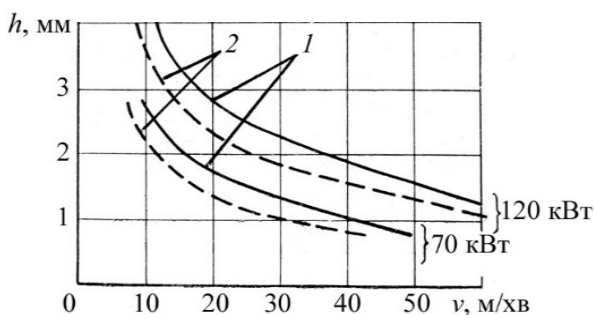
Радіочастотне зварювання виконують із використанням контактного (кондуктивного) та індуктивного способів передачі енергії. Контактний підвід струму зазвичай застосовують при частотах радіодіапазону (більше 60 кГц). Поздовжнє зварювання труб великих діаметрів виконують тільки при кондуктивному способі нагрівання, при якому витрати енергії в 2–3 рази менші, ніж при індукційному. При зварюванні труб великих діаметрів і товщин необхідне нагрівання дуже тонкого шару, тому використовують струми частотою 440 кГц. Для труб малих діаметрів рекомендується індукційне нагрівання охоплюючим індуктором. Найменші витрати енергії при такому способі нагрівання спостерігаються при діаметрах 35...45 мм. При діаметрах труб 220...530 мм використовують індукційний спосіб нагрівання охоплюючим індуктором на частоті 440 кГц та внутрішнім індуктором на частотах 8...10 кГц. Виходячи з продуктивності процесу, частоти 8...10 кГц рекомендуються при товщинах більше 8 мм.

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

При кондуктивному способі нагрівання труб частота струму 440 кГц забезпечує проникнення магнітного поля на глибину 0,05...0,07 мм у сталь і 0,1 мм у мідь, а також відповідно високу концентрацію енергії та швидкість зварювання 20...100 м/хв залежно від товщини (рис. 1.60,*а*). Для порівняння на рис. 1.60,*б* наведено товщини, потужності і швидкості зварювання при індукційному нагріванні.



*а*



*б*

Рис. 1.60. Взаємозв'язок товщини металу  $h$  і швидкості радіочастотного зварювання  $v$  вуглецевої сталі при різних потужностях зварювального пристрою і контактному струмопідводі (*а*) та нержавіючої аустенітної сталі (1) і вуглецевої сталі (2) при індукційному струмопідводі (*б*)

Радіочастотне зварювання з ковзними контактами використовують також для виготовлення спіральних труб великих діаметрів, труб зі спіральним ребром, труб із подовжніми ребрами тощо. Схему зварювання спіральних труб показано на рис. 1.61.

Спіральні труби формують системою валків. Смуга розмотується з рулону, її крайки обробляють механічним різанням, створюючи скоси, як показано на рис. 1.61. За допомогою валків 2 крайки труби і смуги стискаються в місці сходження під невеликим кутом. Унаслідок пластичної деформації товщина металу в зоні зварювання дорівнює товщині смуги.

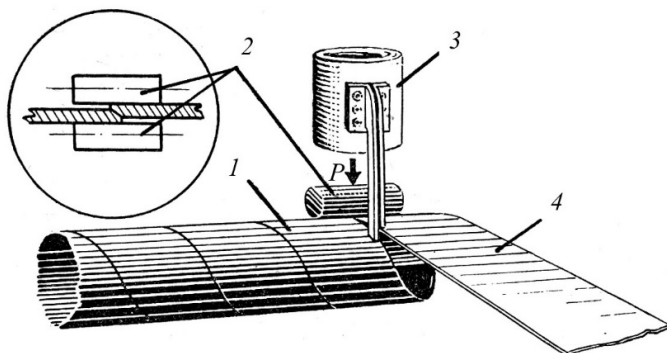


Рис. 1.61. Схема радіочастотного зварювання спіральних труб:  
1 – труба; 2 – стискуючі валки; 3 – нагрівальний контур із ковзним струмопідводом; 4 – металева штаба

Принципову схему зварювання котельних труб зі спіральним ребром для колектора суднового котла показано на рис. 1.62.

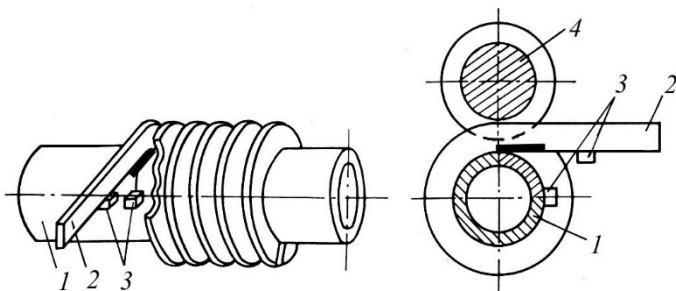


Рис. 1.62. Схема радіочастотного зварювання котельних труб зі спіральним ребром:  
1 – труба; 2 – стрічка ребра; 3 – ковзний струмопідвід; 4 – притисний ролик

При зварюванні трубі надається поступальний рух уздовж і обертальний навколо осі труби. Під прямим кутом до утворюючої труби подається стрічка 2, яка роликом 4 притискається до труби.

Для зварювання використовується струм частотою 440 кГц. Розігрітий у місці сходження метал труби і стрічки при стисненні зварюються. Струм підводиться за допомогою ковзних контактів, розташованих на відстані 40...50 мм від точки сходження ребра і труби.

Для стикового зварювання котельних труб застосовують машини типу МВЧТ-02, які встановлюються в лінії виробництва змійовиків і забезпечують високий рівень механізації та автоматизації всіх підготовчих і зварювальних операцій. Зварювання виконується в захисному газовому середовищі.

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

Перспективним у суднобудуванні є високочастотне зварювання таврових і двотаврових балок. Установка для зварювання двотаврових балок висотою від 152 до 400 мм може забезпечити швидкість зварювання 2700...3000 м/год [23].

Індукційне стискове зварювання труб виконується за схемою, показаною на рис. 1.59,*а*, а безперервне поздовжнє зварювання труб – за схемою, показаною на рис. 1.59,*в*. Зварювання тиском у пластичному стані може виконуватися в широкому температурному інтервалі, однак необхідно враховувати середовище зварювання. Досліди показали, що зварювання низьковуглецевих сталей з індукційним нагріванням без використання флюсів або захисних газових середовищ можливе лише при температурах 1380...1400 °С. При температурах 1370 °С і нижче в зварних з'єднаннях з'являються включення оксидної плівки, що являє собою в'юстит, тобто закис заліза FeO. Температура плавлення FeO залежить від вмісту в ньому кисню, що знаходиться в межах 23,16...25,60 % та змінюється від 1371 до 1424 °С [86]. В'юстит у зварних з'єднаннях містить 23,3 % кисню і має температуру плавлення 1371...1375 °С. Тому стабільну якість зварних з'єднань забезпечують температури вище 1380 °С, якщо не застосовується захисне середовище.

Використання захисного середовища дозволяє знизити температуру зварювання до 1200 °С при тиску 40...50 МПа. Застосовують для захисту природний газ або рідкий флюс у вигляді 10 % розчину нітроклітковини в метиловому спирті. Сметаноподібний розчин наносять на внутрішню поверхню труби кільцем шириною 10...15 мм. На торцеві поверхні флюс не наносять. При нагріванні флюсу утворюється газова фаза, яка містить у собі окис вуглецю, вуглеводні і значну кількість молекулярного водню та має відновлювальний характер. Позитивна дія флюсу зберігається весь період зварювання, оскільки процес зварювання короткочасний (2...8 с).

Частота струму для індукційного нагрівання вибирається з розрахунку забезпечення глибини проникнення наведеного струму, що в 2–3 рази більше товщини стінки. Це дозволяє нагріти метал до температури зварювання за декілька секунд і навіть часток секунди.

Величина осадки при зварюванні складає 0,5...1,0 товщини стінки труби. При нагріванні до 1200...1250 °С внутрішній грат не утворюється, а зовнішнє збільшення діаметра труби має плавну форму і висоту 0,5...0,7 товщини стінки труби. Це пояснюється тим, що при нагріванні вузького кільця на кінці труби внаслідок теплового розширення утворюється невеликий розтруб, що визначає напрям руху металу при деформації та виключає втрату стійкості труби. Кращі результати дає схема

деформації, при якій тиск осадки створюється до початку нагрівання і зберігається постійним до кінця зварювання. Це перешкоджає проникненню повітря в стик.

### 1.5.3. Зварювальне устаткування

Установки для високочастотного зварювання складаються з високочастотного генератора, нагрівального пристрою, пристрою для створення тиску і технологічного оснащення. Застосовуються високочастотні лампові генератори та тиристорні і машинні перетворювачі. Лампові генератори мають робочу частоту більше 50 кГц, машинні генератори – до 1...10 кГц, тиристорні генератори – 0,5...8,0 кГц.

Найбільш поширені лампові генератори з робочою частотою 60...74 кГц (ЛПЗ-37, ЛПЗ-2-67, ЛЗ-107, ВЧИ-63/0,66, ВЧИЗ-100/0,066, ВЧИЗ-160/0,066 тощо). У зв'язку із впровадженням високочастотного зварювання при виробництві труб, особливе значення мають лампові генератори з частотою струму 440 кГц і потужністю від 160 до 1000 кВт (ВЧС2-600/0,44; ВЧС2-1000/0,44; ВЧС2-160/0,44; ВЧС1-250/0,44; ВЧС1-600/0,44 тощо).

Електричну схему високочастотної установки ЛПЗ-2-67 показано на рис. 1.63.

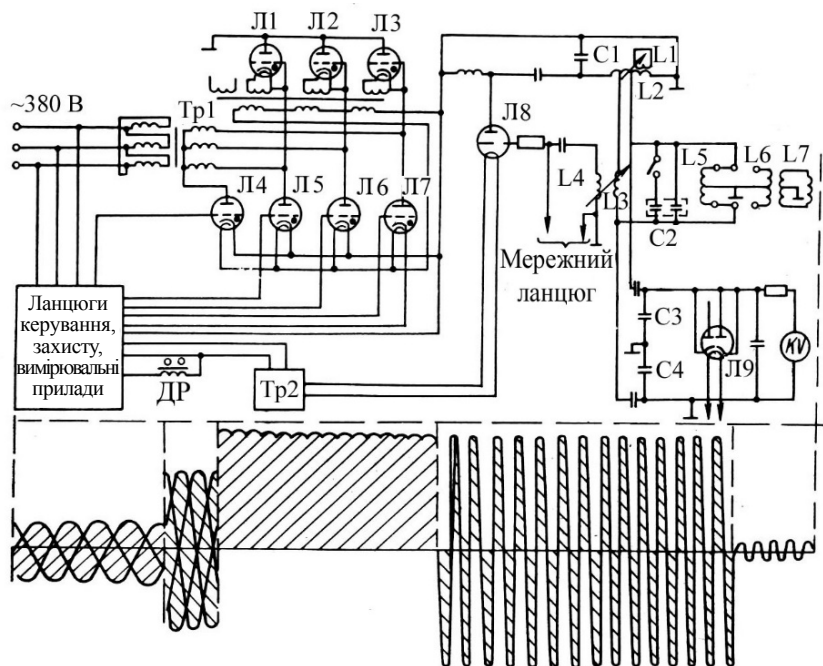


Рис. 1.63. Схема високочастотної установки ЛПЗ-2-67



## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

Нагрівальний контур, утворений трансформатором L6, L7 або плавильною піччю L5 з конденсатором C2, через первинну обмотку трансформатора зворотного зв'язку кондуктивно підключається до індуктивності анодного контуру L2. В анодному контурі, утвореному індуктивністю L2 і конденсатором C1, за рахунок переміщення короткозамкнутої індуктивності L1 всередині індуктивності L2 можна плавно регулювати напругу, яка подається на контур навантаження, та узгоджувати параметри навантаження з параметрами генераторної лампи Л8. Це забезпечує високий ККД генератора (не менше 72 %). Напруга зворотного зв'язку для генераторної лампи Л8 знімається з вторинної обмотки L4 трансформатора зворотного зв'язку і плавно регулюється переміщенням обмотки L4 усередині обмотки L3. Напругу в анодному контурі вимірюють кіловольтметром KV магнітоелектричної системи, включеним через пентотронний випрямляч Л9 і ємнісний подільник напруги C3-C4.

На рис. 1.63 наведено схему високочастотної установки з тиратронним анодним випрямлячем, оскільки такі установки ще успішно експлуатуються в промисловості. Однак сьогодні випускаються високочастотні установки з тиристорними випрямлячами або з напівпровідниковими випрямлячами на діодах з тиристорним регулюванням із низького боку анодного трансформатора. Схему останнього показано на рис. 1.64 [86]. Номінальне значення випрямленого струму: сила струму 24 А, напруга 11 кВ.

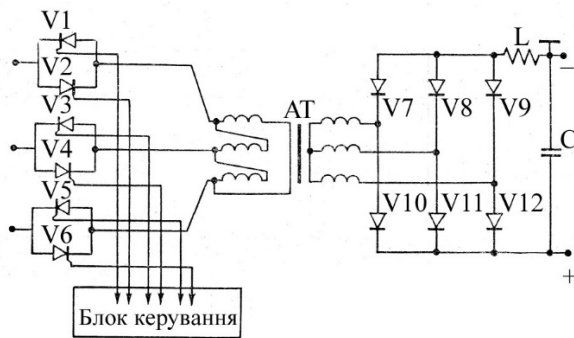


Рис. 1.64. Схема випрямляча з тиристорним регулятором на низькому боці анодного трансформатора:

V1-V6 – тиристири; V7-V12 – діоди; АТ – анодний трансформатор

Схему тиристорного випрямляча з живленням від високовольтного анодного трансформатора показано на рис. 1.65.

Силовий блок випрямляча зібрано за трифазною містковою схемою з шістьма плечима V1-V6. Усі плечі випрямляча зібрані за однаковою схемою і мають по 32 тиристири. Оскільки використовуються тиристири при напрузі до 2 кВ, кожне плече випрямляча зібрано за послідовною

## 1. 5. Високочастотне зварювання

схемою включення тиристорів з відповідною схемою керування. Послідовно з кожним плечем включено дроселі насичення 2 для зниження швидкості наростання струму через тиристири при їх включенні. Номінальні значення випрямленого струму: сила струму 250 А, напруга 12 кВ.

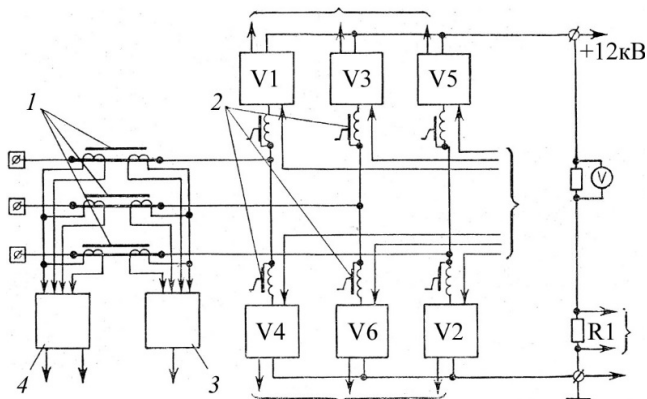


Рис. 1.65. Схема тиристорного випрямляча з живленням від високовольтного анодного трансформатора:

1 – трансформатор; 2 – дросель насичення; 3 – під'єднання до системи сигналізації та захисту; 4 – підключення амперметра струму навантаження; V1-V6 – плечі випрямляча

Головним джерелом струму середньої частоти є машинні перетворювачі. Схему перетворення струму машинним генератором показано на рис. 1.66.

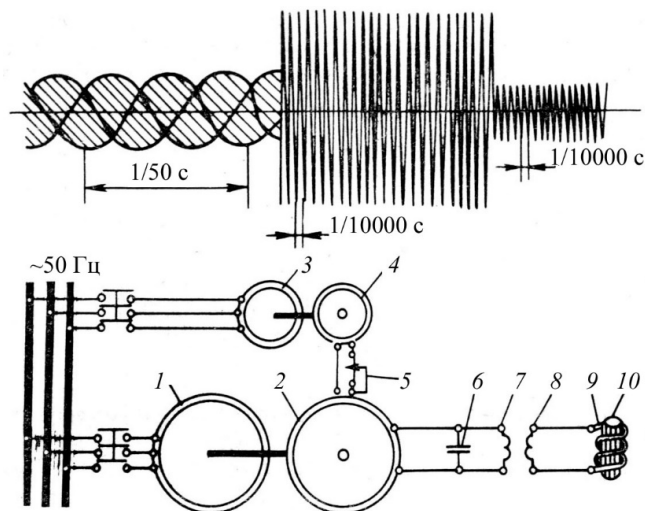


Рис. 1.66. Схема перетворення струму машинним генератором:

1, 3 – електродвигуни; 2 – генератор; 4 – генератор постійного струму; 5 – реостат; 6 – конденсаторна батарея; 7 – первинна обмотка трансформатора; 8 – вторинна обмотка трансформатора; 9 – індуктор; 10 – деталь, що нагрівається

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

Перетворювач частоти складається з генератора 2 і трифазного привідного двигуна 1, що живиться від мережі 50 Гц. Генератор належить до типу індукторних машин, які, як і синхронні, збуджуються постійним струмом. Однак якщо в синхронних машинах обмотки збудження і робочі обмотки змінного струму переміщуються одна відносно іншої при обертанні ротора, то в індукторних машинах зміна взаємозв'язку між обмотками відбувається за рахунок обертання феромагнітної маси ротора. Тому ротор у цих машинах обмоток не має. У термічних установках застосовують різнойменні полюсні (гетерополюсні) генератори в однофазному виконанні. При переміщенні ротора на один полюсний крок у провіднику кожного полюса статорної обмотки відбувається повний цикл зміни напруги. Число полюсних кроків дорівнює числу зубців ротора, а частота одержуваної напруги  $f = zn/60$ , де  $z$  – число зубців ротора;  $n$  – частота обертання ротора за хвилину. Напруга машинних генераторів регулюється реостатом 5 шляхом зміни струму в обмотці збудження.

В установках для високочастотного зварювання застосовують машинні перетворювачі типу ОПЧ-250-10 потужністю 250 кВт з робочою частотою 10 кГц. Установка може мати кілька перетворювачів, включених у паралельну роботу на загальну шину розподільного пристрою. Такими установками є ІС 1-1000/10, ІС 1-2000/10, ІС 1-3000/10 (1000, 2000, 3000 кВт; 10 кГц).

Важливою частиною високочастотного зварювального устаткування є нагрівальний пристрій. Сьогодні використовують контактний струмопідвід із ковзними контактами або роликами та індукційний струмопідвід з охоплюючим або внутрішнім індуктором. Конструкції контактних струмопідводів передбачають установку змінних ковзних контактів. У конструкціях з роликами використовують пристрій із вторинною трансформаторною обмоткою, що обертається, до якої приєднують контактні ролики.

При частотах струму до 8...10 кГц використовують індукційний підвід струму. Індуктори, що встановлюються із зовнішнього боку труби, показано на рис. 1.67. Збільшення діаметра труб призводить до того, що охоплюючі індуктори втрачають свою ефективність через різке збільшення втрат енергії в тілі заготовки. Тому при діаметрах труб більше 200 мм використовують внутрішні індуктори (рис. 1.67,а). Такі індуктори застосовують також у тих випадках, коли встановити індуктори із зовнішнього боку деталі неможливо. Деякі форми внутрішніх індукторів показано на рис. 1.67.

Як видно з рис. 1.67,б-г, індуктор з'єднується з генератором жорсткими шинами, які охолоджуються водою. У ряді випадків габарити конструкцій не дозволяють наблизити такий індуктор до їхніх деталей або

## 1. 5. Високочастотне зварювання

вузлів, що підлягають нагріванню. Для розширення технологічних можливостей нагрівання СВЧ розроблено спеціальні гнучкі кабелі довжиною 10...12 м, що з'єднують індуктор із генератором. Використання коаксіальних кабелів, які набираються з ізольованих провідників діаметром 0,2...0,3 мм, дозволяє забезпечувати гнучкий зв'язок між генератором та індуктором на значних відстанях при мінімальних витратах енергії.

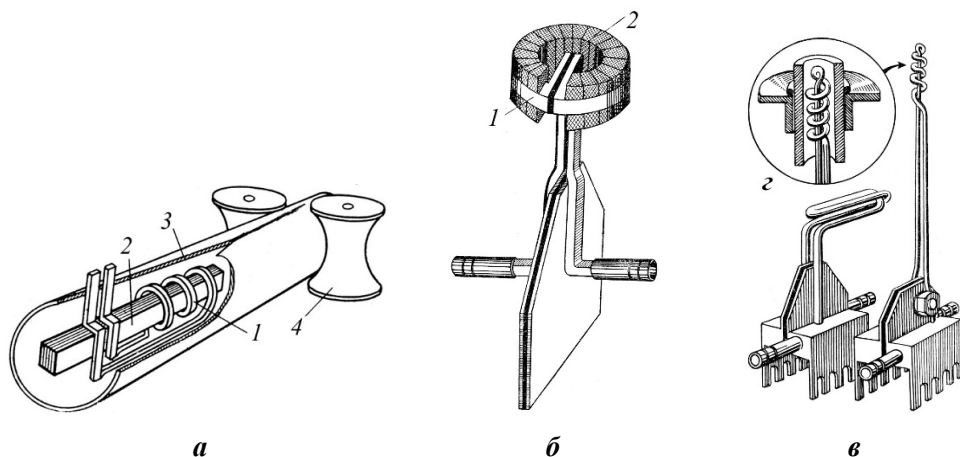


Рис. 1.67. Поздовжнє зварювання труб внутрішнім індуктором (а), індуктором із магнітопроводом (б) та індуктором без магнітопроводу (в, з):  
1 – індуктор; 2 – магнітопровід; 3 – труба; 4 – притискні ролики

### 1.5.4. Особливості та сфери застосування височастотного зварювання

Високочастотне нагрівання широко застосовується в промисловості для зварювання, паяння, термічної обробки. *Можливості високої концентрації енергії та регулювання в широкому діапазоні параметрів режиму і зони виділення теплоти безпосередньо в металі дають переваги цьому способу нагрівання перед іншими. Енергоємність процесу височастотного зварювання значно нижча, ніж при контактному та електродуговому зварюванні. Високочастотне зварювання не має принципових обмежень у швидкості зварювання. Ця його особливість реалізується при промисловому виробництві зварних труб різних діаметрів зі сталі та кольорових металів із прямими та спіральними швами. Наприклад, трубозварювальний агрегат 20-76 потужністю 400 кВт із частотою струму 440 кГц при індукційному нагріванні охоплюючим індуктором дозволяє зварювати труби діаметром до 76 мм та забезпечує швидкість зварювання до 120 м/хв. Агрегат 102-220 з індукційним нагріванням аналогічним індуктором при частоті струму 440 кГц дозволяє зварювати*

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

---

прямошовні труби діаметром до 220 мм при швидкості до 50 м/хв. Стан 159–529 забезпечує швидкість зварювання труб діаметром 210...426 мм до 60 м/хв, що в багато разів більше швидкості електродугового зварювання. У ньому застосовують струм середньої частоти (8...10 кГц), що підвищує рівномірність розподілу енергії по товщині кромки, але виключає контактний підвід струму в зв'язку зі збільшенням сили струму при зменшенні частоти.

Для зварювання прямошовних труб великого діаметра з товщиною стінки 8...10 мм призначено стан 530–820 зі швидкістю зварювання 17...18 м/хв. Використовується струм частотою 440 кГц та контактний роликострумопідвід.

Трубозварювальний агрегат 1220–1620 призначено для зварювання труб із двох напівциліндрів діаметром до 1620 мм і товщиною стінки 8...20 мм. Обидва шва зварюються одночасно за допомогою двох внутрішніх індукторів з магнітопроводами при частоті струму 10 кГц. Загальна потужність агрегату 4000 кВт забезпечується 16-ма машинними генераторами ОПЧ-250-10. При зварюванні кромки зводяться під кутом 3...5°, швидкість зварювання досягає 16...18 м/хв.

Десятки різних агрегатів працюють на трубопрокатних заводах. Вони знаходяться в лініях, що передбачають підготовчі операції, формування труб, їх зварювання, видалення ґрату, охолодження, кінцеве калібрування, виправлення поздовжньої кривизни та різання труб певної довжини, оскільки процес безперервний. Якщо необхідна локальна нормалізація шва, то індукційний нагрівник встановлюється безпосередньо після ґратознімного пристрою.

Створено спеціальні агрегати для зварювання труб із поздовжніми або спіральними ребрами для виготовлення кабелю в зварній алюмінієвій оболонці, біметалічного дроту або смуг тощо.

Використання високочастотного зварювання найбільш ефективно при безперервних процесах масового виготовлення виробів досить простої конфігурації. Асортимент виробів складної конфігурації обмежується особливостями систем струмопідводу та механізмів стиснення.

*До недоліків високочастотного зварювання слід віднести труднощі при зварюванні деяких виробів, наприклад коротких труб, оскільки неможливо уникнути непроварів на початку та в кінці зварного шва.*

*Безперечною перевагою високочастотного способу нагрівання є можливість безконтактного нагрівання та нагрівання у вакуумі.*

Слід відзначити також застосування в промисловості для нагрівання масивних деталей при зварюванні, наплавленні і термічній обробці струму частотою 50 Гц. Ураховуючи вплив частоти на глибину проникнення

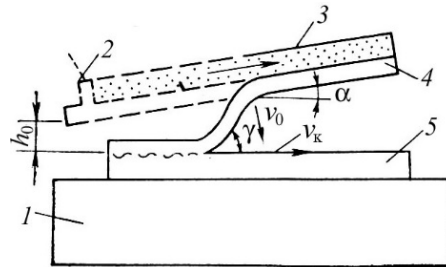
струму в деталь, такий струм доцільно використовувати для глибокого нагрівання. Установки проєктуються звичайно на стандартну напругу (127, 220, 380 В) і підключаються безпосередньо до промислової електричної мережі. Потужність при нагріванні струмами промислової частоти регулюється за допомогою тиристорних перетворювачів або зміною співвідношення ємності конденсаторів, що вмикаються послідовно і паралельно індуктору.

## 1.6. Зварювання вибухом

### 1.6.1. Суть способу

Зварювання вибухом (*sprengschweissen* або *explosionschweissen*; *explosive welding* або *explosion welding*; *сварка взрывом*) – це зварювання тиском, при якому з'єднання поверхонь заготовок утворюються внаслідок їх високошвидкісного зіткнення, здійснюваного за допомогою енергії вибухових речовин або інших джерел енергії з великою питомою потужністю. Принципову схему зварювання металів вибухом (ЗВ) показано на рис. 1.68 [21, 28].

Рис. 1.68. Схема зварювання металів вибухом:  
 1 – фундаментна плита;  
 2 – детонатор; 3 – вибухова речовина;  
 4 – верхня рухома пластина;  
 5 – нижня нерухома пластина



Зварювані пластини звичайно виставляються під деяким кутом одна до одної, і на верхню пластину 4, яка під дією вибуху рухається до нижньої, нерухомої, укладають рівномірним шаром вибухову речовину (ВР). Після ініціювання заряду вибухової речовини детонатором 2 уздовж верхньої пластини поширюється детонаційна хвиля. Під дією продуктів вибуху верхня пластина набуває швидкості  $v_0$  від декількох сотень до декількох тисяч метрів на секунду. При цьому контакт пластин розвивається вздовж поверхні нерухомої пластини з деякою швидкістю  $v_k$ . Верхня пластина двічі перегинається, тому що її похила ділянка рухається за фронтом детонаційної хвилі, а ділянка з непродетонованим зарядом по інерції залишається в початковому стані. Під дією вибуху в зоні контакту пластин розвиваються високі тиски і швидкості деформації, інтенсивне локальне нагрівання, у результаті чого і виникають міжатомні зв'язки.

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

Залежно від параметрів процесу, метал у зоні з'єднання в момент зварювання може знаходитися в твердому стані, з частковим розплавленням у вихрових зонах або у вигляді безперервного шару розплаву. Найбільш високі механічні властивості з'єднань досягаються на режимах, при яких відсутнє розплавлення металу.

Специфічний характер розташування з'єднаних матеріалів, неможливість одержання стикових з'єднань і деякі інші особливості процесу обмежували його технологічні можливості і застосування. Розробка паралельної схеми зварювання, заснованої на використанні вибухових речовин із дозвуковою щодо з'єднаних металів швидкістю детонації, зробила цей процес дуже перспективним для одержання багатошарових матеріалів, плакування великогабаритних виробів тощо. Наприклад, у суднобудуванні широко застосовують біметалічні проміжні перехідники алюміній+сталь для зварювання плавленням сталевго корпусу судна з алюмінієвими палубними надбудовами. Товщина сталевго частини складає 20...40 мм, алюмінієвої – 12...15 мм. Зварювання вибухом відбувається протягом мікросекунд, що запобігає утворенню крихких інтерметалідних прошарків при зварюванні різнорідних матеріалів. Схему зіткнення пластин при їх паралельному розташуванні показано на рис. 1.69.

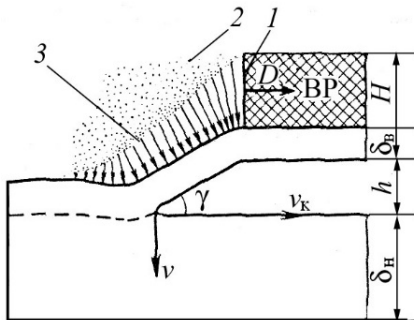


Рис. 1.69. Схема зіткнення зварюваних пластин при їх паралельному розташуванні:

- 1 – фронт детонаційної хвилі;
- 2 – фронт розлітання продуктів вибуху;
- 3 – фронт зони розрідження;
- $D$  – швидкість детонації ВР;
- $v$  – швидкість зіткнення пластин;
- $v_k$  – швидкість руху точки зіткнення;
- $\delta_в$  – товщина верхньої рухомої пластини;
- $\delta_н$  – товщина нижньої нерухомої пластини

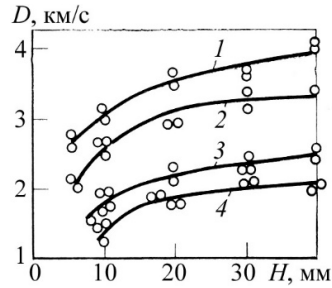
Пластини виставляються паралельно на певній відстані  $h$ . На верхню пластину укладається заряд ВР шаром однакової товщини  $H$ .

Як ВР використовують гранульовані суміші на основі тротилу марки ТНТ і аміачної селітри  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ . Швидкість детонації регулюється домішками солі  $\text{NaCl}$ . Залежність швидкості детонації ВР від товщини і марки ВР показано на рис. 1.70 [21, 28]. При необхідності більш високих швидкостей детонації використовують заряд із гексогену ( $D = 6,2$  км/с).

Швидкість детонації ВР залежить також від грануляції компонентів. Зі зменшенням грануляції густина заряду збільшується від 0,6 до 1,2 г/см<sup>3</sup>. При цьому збільшується також швидкість детонації (від 2,9 км/с при густина 0,6 г/см<sup>3</sup> до 3,7 км/с при густина 1,0 г/см<sup>3</sup> для амоніту № 6 ЖВ).

Рис. 1.70. Залежність швидкості детонації  $D$  вибухової речовини від її товщини  $H$  і складу:

- 1 – амоніт № 6 ЖВ (ТНТ +  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ );
- 2 – амоніт А20 (ТНТ +  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  + 20% NaCl);
- 3 – амоніт А40 (ТНТ +  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  + 40% NaCl);
- 4 – амоніт А50 (ТНТ +  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  + 50% NaCl)



При паралельному розташуванні пластин, як і під кутом (див. рис. 1.68), верхня пластина двічі перегинається. Похила ділянка пластини зі швидкістю  $v_k$ , рівною  $D$ , рухається за фронтом детонаційної хвилі. Зіткнення зварюваних пластин відбувається під деяким кутом  $\gamma$  та спричиняє тиск у десятки тисяч атмосфер. У місці зіткнення пластин з'являється тангенціальна складова швидкості зіткнення в напрямку руху фронту детонаційної хвилі, що викликає сумісну деформацію поверхневих шарів з'єднаних пластин.

Профіль деформованої зони в утвореному з'єднанні подібний до хвилі. Оксидні плівки та інші поверхневі забруднення руйнуються при деформації металу та частково виносяться кумулятивним струменем повітря. Активация поверхні проходить під дією інтенсивної пластичної деформації.

До ЗВ за механізмом утворення зварного з'єднання близьке зварювання вибухом електричного провідника [21]. Його можна використовувати для з'єднання труб із трубними дошками в теплообмінниках. Схему зварювання показано на рис. 1.71.

На провідник 3 електровибухового патрона 7 подається імпульс електричної енергії від батареї конденсаторів 5. Унаслідок високої густини струму в провіднику він переходить з твердого до газоподібного стану, миттєво створюючи високий тиск. Ударні хвилі, які утворюються при вибуху провідника, поширюються через заповнювальне середовище 4 до стінки труби 1 і надають їй великої швидкості руху в напрямку поверхні

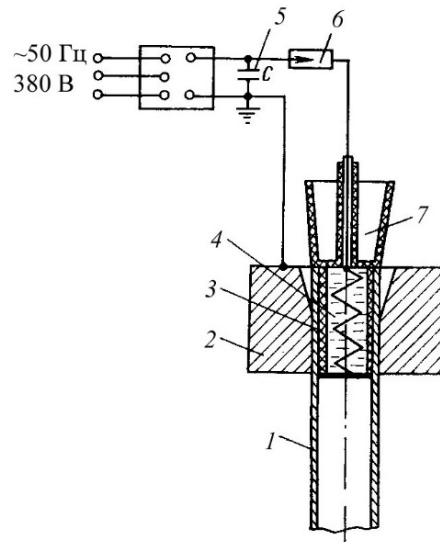


Рис. 1.71. Схema зварювання електричним вибухом провідника:  
 1 – труба; 2 – трубна дошка; 3 – провідник;  
 4 – заповнююча речовина; 5 – батарея конденсаторів; 6 – комутуючий пристрій;  
 7 – електровибуховий патрон



## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

отвору в трубній дошці 2. При високошвидкісному зіткненні поверхонь деталей 1 і 2 відбувається їх зварювання. Перед зварюванням одна з поверхонь, які з'єднуються, обробляється на конус, що забезпечує послідовне переміщення фронту контакту. Оболонки патрона виготовляють із легкоруйнівного матеріалу (звичайно поліетилену), що дозволяє ефективно передавати тиск ударної хвилі на стінки труби. Як наповнюючу речовину патрона можна використати парафін, церезин та інші воскоподібні діелектрики. Таким способом можна з'єднувати сталь, мідь, алюміній, а також отримувати різномірні сполучення міді зі сталлю, алюмінію зі сталлю, міді з алюмінієм. Міцність з'єднань складає 50...80 % міцності основного металу.

### 1.6.2. Технологія зварювання

Основні параметри високошвидкісного зіткнення при зварюванні вибухом підрозділяють на *кінематичні* (швидкість рухомої пластини  $v_0$ , кут зіткнення  $\gamma$ , швидкість руху точки контакту  $v_k$ ) і *фізичні* (тиск, температура, тривалість зіткнення). Ці параметри залежать від початкових параметрів процесу. До початкових параметрів належать параметри вибухової речовини (гранична швидкість детонації  $D$ , початкова густина  $\rho$ , величина заряду, його довжина), властивості зварювальних матеріалів (*стисливість, густина тощо*) і параметри взаємного розташування пластин (мінімальна початкова відстань між пластинами  $h_0$ , початковий кут між пластинами  $\alpha$ ). При відомих початкових параметрах можна розрахувати швидкість рухомої пластини та тиск.

При зварюванні вибухом розрізняють три типи з'єднань, які показано на рис. 1.72.

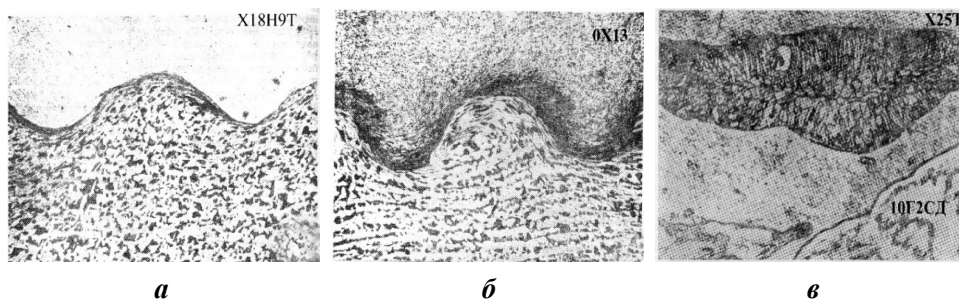


Рис. 1.72. Мікроструктура хвилеподібних з'єднань сталі X18H9T і низьковуглецевої сталі (а), сталі 0X13 і низьковуглецевої сталі (б) та сталей X25T і 10Г2СД з оплавленням металу (в):

а, б –  $\times 70$ ; в –  $\times 300$

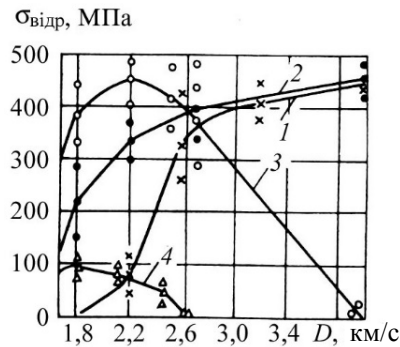
Перший тип характеризується прямою або синусоїдальною границею поділу з'єднаних у твердому стані матеріалів, другий – хвилеподіб-

## 1. 6. Зварювання вибухом

ною границею і наявністю вихрових зон, третій – безперервним шаром розплавленого металу. Перший тип спостерігається при не досить інтенсивних швидкостях зіткнення та нагадує з'єднання при холодному зварюванні. Третій тип характерний для високих значень швидкостей руху точки зіткнення  $v_k$  і кутів зіткнення  $\gamma$ . З'єднання другого типу утворюються при проміжних параметрах режиму і найбільш поширені при зварюванні вибухом. Мікроструктуру з'єднання другого типу показано на рис. 1.72, *a, б* [6, 21]. На першому рисунку (*a*) немає жодних прошарків у зоні з'єднання, на другому (*б*) спостерігається утворення нової фази на вершинах та підшвах хвиль. На рис. 1.72, *в* показано третій тип з'єднання з оплавленим металом [21, 70].

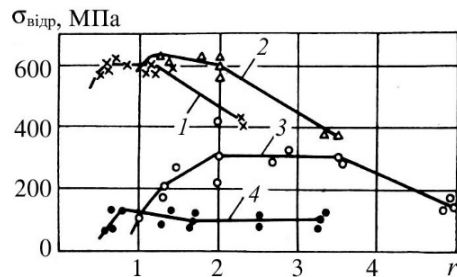
Хвилеутворення пояснюється поперемінним випинанням з'єднаних поверхонь перед лінією контакту і має гідродинамічну природу. Такі з'єднання характеризуються високою міцністю і стабільністю властивостей. Тому найменша швидкість детонації  $D$  вибухової речовини обмежується початком хвилеутворення в граничній зоні з'єднання. Вплив швидкості детонації вибухової речовини на міцність з'єднань при паралельній схемі зварювання показано на рис. 1.73 [21].

Рис. 1.73. Вплив швидкості детонації вибухової речовини на міцність з'єднань при відриві:  
1 – сталь + сталь; 2 – титан + титан;  
3 – титан + сталь; 4 – алюміній + сталь



Важливим технологічним параметром є відношення  $r$  маси вибухової речовини до маси рухомої пластини. Вплив величини  $r$  при оптимальній швидкості детонації на міцність біметалічних з'єднань показано на рис. 1.74 [21].

Рис. 1.74. Залежність міцності з'єднань при відриві від коефіцієнта  $r$  (відношення маси вибухової речовини до маси рухомої пластини):  
1 – 12Х18Н10Т + низьколегована сталь;  
2 – ВТ1-0 + ОТ4; 3 – ВТ1-0 + сталь;  
4 – алюміній + сталь



## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

Зі збільшенням величини  $r$  у зоні зварювання ростуть розміри ділянок, які розплавляються. При зварюванні деяких металів, наприклад алюмінієвих і титанових сплавів, це може призвести до появи дрібних тріщин.

Початкова відстань між пластинами при паралельній схемі зварювання визначається, в основному, товщиною рухомої пластини. Оптимальна величина початкової відстані приблизно дорівнює товщині цієї пластини. Зі збільшенням початкової відстані в зоні з'єднання з'являються розплавлені ділянки металу. Якщо рухома пластина розташовується під кутом до нерухомої, то для більшості металів цей кут складає до  $7^\circ$ .

При деяких параметрах ЗВ з'єднання не утворюється, незважаючи на наявність слідів схоплювання і хвилеподібну деформацію контактних поверхонь. Це пояснюється тим, що в процесі зіткнення поверхонь виникають розтяжні напруження, здатні зруйнувати ще не повністю сформоване з'єднання. Руйнівні напруження пов'язують із хвилями розвантаження, що виникають при відбитті ударних хвиль від вільних поверхонь пластин. Ці напруження можуть бути значними при  $v_k > c_0$ . Швидкість руху точки контакту  $v_k$  дорівнює швидкості детонації  $D$ . Тому швидкість детонації  $D$  не повинна перевищувати швидкості звуку  $c_0$  у металах, що з'єднуються ( $D < c_0$ ). Оптимальні швидкості детонації знаходяться в межах 2,0...3,5 км/с.

Існують декілька умов хвилеутворення в зварному з'єднанні. Першим критерієм є тиск  $p$ , що розвивається при вибуху і залежить від швидкості детонації  $D$ , густини ВР  $\rho_0$  та продуктів його детонації  $\rho$  ( $\rho \approx 1,3\rho_0$ ) [6]:

$$p = D^2 \rho_0 (\rho - \rho_0) \rho, \text{ ат,}$$

де  $D$ , м/с;  $\rho$ ,  $\rho_0$ , г/см<sup>3</sup>.

Умовою хвилеутворення щодо тиску є

$$p \geq p' \approx G/2\pi \approx 10\text{HV},$$

де  $G$  – модуль зсуву; HV – твердість за Віккерсом;  $p'$  – критичний тиск, при якому зварюваний метал переходить із пружного в пластичний стан. Існує також мінімальне значення швидкості рухомої пластини  $v'_0$ , нижче якого зіткнення є пружним. Тому швидкість пластини  $v_0$  має бути більшою  $v'_0$ :  $v_0 > v'_0$ .

Для кожного значення початкового кута  $\alpha$  є критичне значення швидкості рухомої пластини, нижче якого хвилеутворення не існує. Незалежно від початкового кута  $\alpha$ , для кожної комбінації металів існує кри-

## 1. 6. Зварювання вибухом

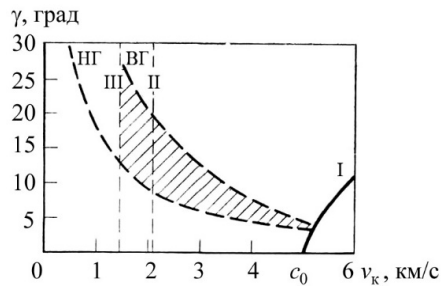
тичне значення швидкості руху точки контакту  $v'_k$ , нижче якого хвилі не утворюються. Тому швидкість руху точки зіткнення повинна бути більше від критичної:  $v_k > v'_k$ , але оскільки  $v_k = D$ , а  $D < c_0$ , то швидкість руху точки зіткнення повинна бути меншою від швидкості звуку в зварюваних металах:  $v_k < c_0$ .

Для зварювання вибухом переважно застосовують режими, коли  $v_k > v'_k$ ,  $v_0 > v'_0$ ,  $v_k < c_0$ ,  $p > p'$ .

Розміри хвиль і їх форма залежать від початкового кута між пластинами, відстані між ними  $h_0$  та співвідношення  $r$  маси ВР і пластини.

При високошвидкісному зіткненні пластин можливі різні форми плинину металу, але утворення з'єднань можливе лише при деяких із них. Граничні умови утворення з'єднань можна визначити за діаграмою (рис. 1.75) [21, 28]. Виходячи з гідродинамічної моделі зіткнення пластин, основними параметрами вибрано кут зіткнення  $\gamma$  та швидкість руху точки контакту  $v_k$ .

Рис. 1.75. Граничні умови утворення з'єднання при зварюванні металів вибухом



Нижче кривої НГ параметри процесу такі, що основна маса пластин знаходиться в пружному стані; вище кривої ВГ відбувається розплавлення металу та руйнування з'єднань. Таким чином, НГ і ВГ – нижня та верхня границі зварювання. Крива І і пряма ІІ обмежують область існування режимів кумуляції, а прямі ІІ і ІІІ обмежують область зсувних деформацій з прямою границею з'єднання металів.

Заштрихована область на рис. 1.75 обмежує область параметрів у координатах  $\gamma-v_k$ , при яких можливе зварювання вибухом. Відповідні режими характеризуються розвитком значної пластичної деформації металу в зоні з'єднання і наявністю кумулятивного струменя попереду точки зіткнення.

Зварювання може виконуватися при паралельному розташуванні пластин або під кутом. Перед зварюванням з'єднувані поверхні зачищають і знежирюють, при зварюванні титану та аустенітних сталей допускається травлення поверхонь.

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

Для вибору оптимальних режимів зварювання розроблено наступні практичні рекомендації [28]:

1. Необхідно забезпечити умови хвилеутворення в зоні з'єднання.
2. Необхідно виключити можливість утворення локальних ділянок розплавленого металу.

3. Величина заряду ВР та початкова відстань між пластинами повинні бути такими, щоб залишковий тиск продуктів вибуху був співмірним із динамічною границею плинності зварюваних металів.

Металографічні дослідження зварних з'єднань показують відсутність у з'єднанні оксидних плівок та інших неметалічних включень, що обумовлено їх віднесенням із поверхонь пластин кумулятивним струменем. Поблизу границі з'єднання відбувається помітне зміцнення металу і підвищення твердості, що викликано значними пластичними деформаціями в зоні хвилеутворення. Розподіл мікротвердості металу зварних з'єднань сталі Х17 і титанового сплаву ВТ6 показано на рис. 1.76.

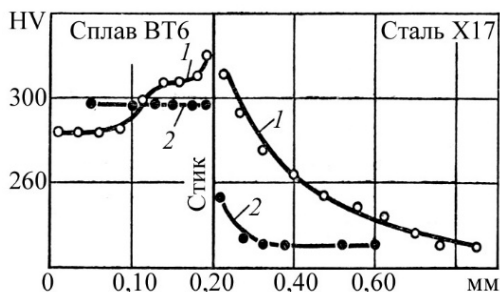


Рис. 1.76. Розподіл твердості в поперечному перерізі зварних з'єднань титанового сплаву ВТ6 і сталі Х17 при  $v_0 = 2000$  м/с:  
1 –  $W = 3,2$  Дж/см<sup>2</sup>; 2 – 160 Дж/см<sup>2</sup>

Зварні з'єднання мають досить високі механічні властивості. При випробуваннях руйнування звичайно проходить по більш слабкому металу на деякій відстані від стику. Вимірами мікротвердості встановлено зміцнення металу в зоні з'єднання шириною 10...100 мкм. Відпуск при температурах 300...400 °С зменшує твердість металу в зоні зміцнення.

Короткочасність процесу зварювання, яка складає мікросекунди та недостатня для розвитку дифузійних процесів, запобігає утворенню крихких фаз між різнорідними металами.

### 1.6.3. Устаткування, особливості та сфери застосування зварювання вибухом

Зварювання вибухом проводять на відкритих полігонах, якщо маса заряду складає десятки і більше кілограмів, або в спеціальних виробничих приміщеннях, коли маса заряду порівняно мала. Для зварювання вибухом розроблено та створено спеціальні вибухові камери. Для зварювання біметалічних труб та інших деталей застосовують спеціальне оснащення.

Найбільш часто застосовують насипні ВР, оскільки вони дозволяють створювати заряди необхідних форм і розмірів. Поряд із раніше названими амонітами і гексогеном застосовують гранулол, гранулiт та зерногранулiт, амонал, кожен з яких має свій критичний діаметр – розмір, менше якого детонація повністю затухає. Для чистих ВР критичні діаметри малі (0,5...3,0 мм), а в сумішах можуть значно збільшуватися (до 100...150 мм).

Особливістю зварювання вибухом є високошвидкісне зіткнення поверхонь при високоінтенсивній силовій дії та утворення з'єднань протягом мікросекунд. За цей час відбувається утворення фізичного контакту й активація поверхонь, а процеси об'ємної взаємодії розвинулися не можуть навіть при високих температурах.

Для зварювання вибухом, як і для інших способів зварювання тиском, пластична деформація є обов'язковою умовою з'єднання. Головною відмінною особливістю деформації при зварюванні вибухом є утворення попереду точки зіткнення потоку маси (струменя або частинок), який забезпечує самоочищення зварюваних поверхонь. Цей ефект чітко виявляється при режимах кумуляції. При хвилиутворенні поверхневі плівки руйнуються і видаляються у вигляді окремих частинок, які заповнюють простір перед точкою контакту. Вони можуть частково залишатися у вихрових зонах (зони інтенсивного перемішування), що вимагає попереднього механічного зачищення поверхонь, які зварюються.

Пластична деформація при зварюванні вибухом характеризується високими інтенсивністю, локалізацією та короткочасністю, які супроводжуються значним підвищенням температури. Це може призвести до рекристалізації, локального оплавлення, дифузії й утворення хімічної та фізичної мікронеоднорідності, крихких фаз, порожнин, тріщин тощо. Тому пластична деформація, з одного боку, повинна бути достатньою для самоочищення і схоплювання контактних поверхонь, а з другого – не дуже високою, щоб виключити можливість утворення дефектів у зоні з'єднання.

При ЗВ необхідно враховувати можливість утворення кінцевого непровару внаслідок того, що в кінці пластин у результаті відбиття ударної хвилі від торцевих поверхонь утворюються розтяжні напруження, які руйнують з'єднання. Їх необхідно компенсувати зовнішнім тиском продуктів вибуху, що досягається збільшенням відношення  $r$  маси вибухової речовини до маси рухомої пластини та зменшенням відстані  $h_0$  між пластинами.

Основною перевагою зварювання вибухом є можливість отримання з'єднань із різнорідних металів. Цей спосіб широко застосовують для отримання великогабаритних листів сталі, плакованих міддю, алюмінієм, латунню, та вуглецевої сталі нержавіючою сталлю тощо. Після з'єднання

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

вибухом сталі з плакуючим металом проводиться обробка біметалу (виправлення, термічна обробка, обрізування тощо). Найбільш жорсткі вимоги до параметрів режиму ставляться при зварюванні сталі з титаном, оскільки наявність розплавленого металу різко зменшує міцність з'єднань. Тому необхідне застосування малих зарядів і ВР із низькою швидкістю детонації (2,0...2,5 км/с), що дозволяє отримати якісні біметалічні листи довжиною до 1 м. При збільшенні довжини листів на відстані більше 2 м від точки ініціювання ВР спостерігається поступове зменшення міцності біметалічного металу, хаотично розташовані дефекти та поява суцільних розшарувань. Це явище пояснюється нестабільністю параметрів режиму, зокрема, збільшенням початкового зазору  $h_0$  під впливом руху повітря в зазорі попереду фронту детонації ВР, локальної зміни густини та висоти ВР, деформації плакуючого листа тощо.

Для отримання якісного великогабаритного біметалу необхідно забезпечувати рівномірний *початковий зазор* та його збереження в процесі зварювання за допомогою спеціальних прокладок, поділ заряду ВР на комірки кубічної форми, ініціювання заряду вздовж довгої сторони. При виготовленні біметалів якість з'єднання залежить також від співвідношення мас нерухомої та рухомої пластин, матеріалу основи, на якій розміщують нерухому деталь. Для зняття залишкових напружень проводять термічну обробку біметалу при температурах, які не викликають негативних змін у зоні з'єднання. Наприклад, температура нагрівання біметалу сталь + титан не повинна перевищувати 550 °С.

Зварювання вибухом широко застосовують для виготовлення товстостілових заготовок, які підлягають прокатуванню для отримання великогабаритних біметалічних листів необхідної товщини. Наприклад, заготовка сталі товщиною 200...300 мм зварюється з плакуючим металом товщиною 10...25 мм. При товщинах плакуючого металу більше 10 мм по периметру біметалічної заготовки утворюються непровари. При наступному прокатуванні біметалічних заготовок у місцях непроварів може виникнути відшарування плакуючого металу. Для запобігання утворенню непроварів при товщинах плакуючого шару більше 16 мм необхідно зменшувати швидкість детонації ВР. Із метою зменшення напружень при плакуванні металами великої товщини рекомендуються мінімальні значення величини  $r$ . Наприклад, якщо при товщині 2,5 мм плакуючого листа нержавіючої сталі  $r = 1,2$ , то при товщині 10 мм  $r = 0,8$ , а при товщині 30 мм  $r = 0,6$  [28, 70].

Поряд зі схемами зварювання листового металу існує схема зварювання біметалічних труб. При внутрішньому плакуванні зовнішню трубу розміщують у масивному циліндричному контейнері для запобігання

значній пластичній деформації труби. Вибухову речовину розміщують на поверхні внутрішньої труби, при зовнішньому плакуванні – на поверхні зовнішньої труби. Розроблено комбіновану схему зварювання труб із розміщенням ВР на поверхнях внутрішньої і зовнішньої труб та з одночасною детонацією ВР.

Режими прокатування, зокрема температура біметалічних заготовок, визначаються природою з'єднуваних матеріалів. Вони не повинні призводити до утворення крихких прошарків та негативного впливу на якість з'єднання.

Зварювання вибухом застосовують для виготовлення ряду деталей. У 1967 р. в ЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено способи локального і шовного зварювання еквідистантно розташованих тонкостінних деталей, листів і замкнутих оболонок за допомогою подовжених зарядів вибухової речовини з великою швидкістю детонації. Застосування таких зарядів дозволяє звести до мінімуму крайові непровари, характерні для зварювання вибухом. На основі цих способів упроваджено промислову технологію зварювання вибухом алюмінієвих оболонок кабелів зв'язку, сталеалюмінієвих штирів тощо.

## 1.7. Магнітно-імпульсне зварювання

### 1.7.1. Суть способу і технологія зварювання

Магнітно-імпульсне зварювання (*magnet-impuls schweissen; magnetic-puls welding; магнитно-импульсная сварка*) – це зварювання тиском, яке здійснюється в результаті зіткнення з'єднуваних поверхонь під дією імпульсного магнітного поля індуктора та наведеного ним у заготовках струму. Спосіб зварювання заснований на використанні сил електро-механічної взаємодії між вихровими струмами, наведеними в деталі імпульсним магнітним полем і самим магнітним потоком імпульсу. Імпульсне магнітне поле створюється розрядом батареї конденсаторів на індуктор, в якому поміщають зварювані деталі. Схему магнітно-імпульсного зварювання (МІЗ) показано на рис. 1.77 [16].

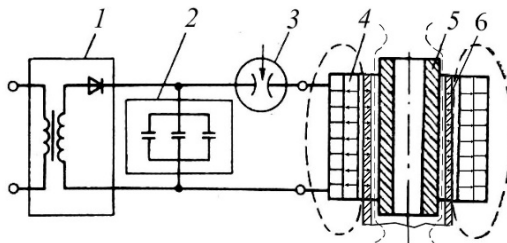


Рис. 1.77. Принципова схема магнітно-імпульсного зварювання



## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

Установка для МІЗ складається із зарядного пристрою 1, до якого входять високовольтний трансформатор і випрямляч, батареї конденсаторів 2, комутуючого пристрою 3 та індуктора 4. При подачі імпульсу на допоміжний електрод комутуючого пристрою відбувається розряд батареї високовольтних конденсаторів на індуктор 4. Індуктор створює сильне магнітне поле, яке наводить індуктований струм у деталі рухомій 6. При взаємодії струму індуктора з індуктованим струмом у деталі 6 виникають сили відштовхування між індуктором і деталлю. Унаслідок цього деталь на ділянці під індуктором, отримуючи високу швидкість руху, переміщається до нерухокої деталі 5. У результаті зіткнення поверхонь з'являються значні пластичні деформації, які забезпечують утворення зварного з'єднання. Швидкість зіткнення досягає  $10^2 \dots 10^3$  м/с, а тиск у зоні контакту –  $10^3 \dots 10^4$  МПа.

Як і при зварюванні вибухом, основними кінематичними (динамічними) параметрами при магнітно-імпульсному зварюванні є швидкість зіткнення  $v_0$ , швидкість розвитку контакту  $v_k$  і кут зіткнення поверхонь  $\gamma$ . Ці параметри залежать від початкових параметрів деталей (розміри, питомий електричний опір, швидкість звуку в матеріалі), їх взаємного розташування (зазор і кут між поверхнями, які з'єднуються), енергії розряду, характеристик розрядного контуру, розташування виробу в індукторі. Зазор між зварюваними деталями необхідно мати для розгону рухокої деталі. Кут між поверхнями здебільшого складає  $3 \dots 7^\circ$ . Розроблено технологію зварювання паралельних поверхонь. Залежно від з'єднуваних матеріалів існують певні параметри  $v_0$ ,  $v_k$ ,  $\gamma$ , які забезпечують утворення зварного з'єднання.

Можливі варіанти магнітно-імпульсного зварювання показані на рис. 1.78, а–е [16].

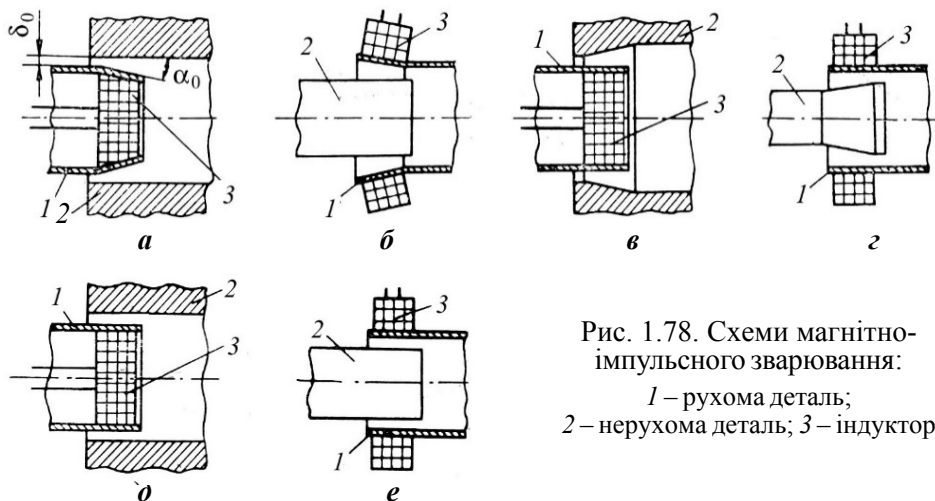


Рис. 1.78. Схеми магнітно-імпульсного зварювання:  
1 – рухома деталь;  
2 – нерухома деталь; 3 – індуктор

Перед зварюванням поверхні зачищають, знежирюють і розміщують в індукторі, як показано на рис. 1.77. Для кращих умов зварювання необхідно прагнути, щоб матеріал рухомої деталі мав високу електропровідність, малу густину і низьку границю плинності. Якщо матеріали обох деталей мають низьку електропровідність, то для збільшення тиску між ними встановлюють сполучне кільце з матеріалу з високою електропровідністю і зварюють за схемами, показаними на рис. 1.78, *д, е*. При зварюванні різновисотних труб рухомою вибирають більш тонкостінну. Для одержання найбільш широкої зони зварювання необхідно застосувати схеми, показані на рис. 1.78, *а–г*, з початковим кутом  $\alpha > 0$ . Схеми, показані на рис. 1.78, *д, е*, при  $\alpha = 0$  дають дві кільцеві зони зварювання з розташованим між ними непроваром. Зона з'єднання може бути без хвиль або мати хвилеподібний характер, як при зварюванні вибухом. Зварне з'єднання утворюється на ділянках, де швидкість зіткнення досягає мінімально необхідної величини і є умови для інтенсивної пластичної деформації з'єднаних поверхонь.

Магнітно-імпульсне зварювання можна вести також із нагріванням від генератора струмів високої частоти та стисненням деталей подачею на той же індуктор імпульсу струму від магнітно-імпульсної установки.

Магнітно-імпульсні установки являють собою генератори імпульсних струмів ємнісного типу з індуктивним навантаженням. Установки компонуються зарядним та розрядним блоками. До зарядного блока входять високовольтний трансформатор масляного наповнення, випрямляч, система автоматики. До розрядного блока входять накопичувач енергії, комутуючий пристрій, індуктор. У промисловості застосовуються магнітно-імпульсні установки типу МІУ (МІУ-20 енергоємністю 20 кДж, МІУ-50, МІУ-100).

Важливий елемент магнітно-імпульсної установки – індуктор, що знаходиться в умовах інтенсивного механічного і теплового навантаження. Індуктори можуть бути разового та багаторазового використання. Головним елементом індуктора є одно- або багатовиткова струмопровідна спіраль, форма робочої поверхні якої повторює з еквідистантним проміжком форму деталі.

Для зменшення тиску на індуктор розроблено схему деформації труб із використанням концентратора магнітного потоку. Застосування змінних концентраторів для заготовок різних розмірів дозволяє використовувати один індуктор. Можливі також інші схеми [16].

### **1.7.2. Особливості та сфери застосування магнітно-імпульсного зварювання**

Магнітно-імпульсне зварювання можна виконувати на повітрі, у захисному середовищі або у вакуумі. На відміну від інших способів деформування,

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

---

при магнітно-імпульсному зварюванні деформуючі зусилля створюються в самому металі, що виключає необхідність оснащення для стискування. У порівнянні зі зварюванням вибухом процес магнітно-імпульсного зварювання легко контролюється.

До недоліків МІЗ необхідно віднести обмеження типів і площі зварних з'єднань, а також тиску на деталь, що обумовлено міцністю і довговічністю індуктора.

Однією з основних умов магнітно-імпульсної обробки металів є їх висока електропровідність, оскільки магнітне поле індуктора інтенсивно впливає на заготовку лише у випадку, коли поле за час розряду не встигає проникнути через стінку заготовки. Матеріали, що погано проводять електричний струм, обробляють, використовуючи покриття з високою електропровідністю.

Магнітно-імпульсне зварювання застосовується для одержання з'єднань унапуск рівно- і різнотовщинних труб між собою та з іншими деталями. Магнітно-імпульсні установки можуть використовуватися також для нагрівання деталей, наприклад при паянні. Регулюючи величину енергії і число послідовних розрядів установки, можна змінювати температуру нагрівання деталей.

При зварюванні різнорідних матеріалів умови для самоочищення з'єднуваних поверхонь можуть не бути оптимальними одночасно для двох металів. Тому метал із більш стійкими оксидними плівками необхідно перед зварюванням піддавати механічній обробці або травленню. При зварюванні металів із великою різницею механічних властивостей доцільно застосовувати попередній підігрів більш міцного металу.

Зварювання труб із внутрішнім розміщенням індуктора більш сприятливе, оскільки збільшення поверхні внутрішньої труби при її деформації покращує умови очищення поверхні від оксидної плівки.

Зварювання алюмінію з алюмінієм та різнорідних металів, наприклад АД1 + М1, АД1 + Ст3, АД1 + 12Х18Н10Т, показало можливість утворення в зоні з'єднання фаз з високою твердістю, що вимагає кількісної оцінки енергії, необхідної для формування зварного з'єднання. Ця енергія стає найбільш важливою характеристикою процесу. Її значення залежить від схеми процесу. Найбільш поширеними схемами є схеми магнітно-імпульсного зварювання труб між собою та з іншими деталями. При цьому передбачаються засоби, які попереджають деформацію нерухомої деталі. Визначення необхідної для зварювання за цими схемами енергії розглянуто в роботі [16].

Зварюванням можна з'єднувати практично будь-які метали за малий проміжок часу (мікросекунди), протягом якого відбувається

лише захоплення поверхонь, а дифузійні процеси розвинулися не встигають. Тиск магнітного поля може бути сконцентрований на досить малій ділянці заготовок, тому непроварів на кінцевих ділянках немає.

Перспективи розвитку МІЗ пов'язані з можливістю створення сильних імпульсних магнітних полів при високій стійкості індуктора, оскільки при сильних полях індуктор інтенсивно нагрівається. Розроблено схеми охолодження індуктора рідким азотом, скорочення часу протікання через індуктор розрядного струму тощо. Ці заходи сприяють вирішенню однієї з основних проблем зварювання, але ускладнюють устаткування і технологію.

### **Контрольні питання і завдання**

1. Суть і особливості зварювання в твердому стані порівняно зі зварюванням плавленням.

2. Класифікація способів зварювання тиском за температурою зварювання, головними параметрами процесу та інтенсивністю і величиною пластичної деформації.

3. Три умовно виділені стадії в узагальненій схемі зварювання в твердому стані.

4. Суть та головні параметри процесів:

- холодного зварювання;
- ХЗ з деформацією зсуву;
- ультразвукового зварювання;
- зварювання тертям за класичною схемою;
- інерційного ЗТ;
- ЗТ з переміщенням металу;
- високочастотного зварювання;
- три способи ВЧЗ;
- зварювання вибухом;
- магнітно-імпульсного зварювання.

5. Типи зварних з'єднань при використанні:

- холодного зварювання;
- ХЗ з деформацією зсуву;
- ультразвукового зварювання;
- зварювання тертям за класичною схемою;
- інерційного ЗТ;
- ЗТ з переміщенням металу;
- високочастотного зварювання;

## 1. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

---

- три способи ВЧЗ;
- зварювання вибухом;
- магнітно-імпульсного зварювання.

### 6. Технологічні особливості:

- холодного зварювання;
- ХЗ з деформацією зсуву;
- ультразвукового зварювання;
- зварювання тертям за класичною схемою;
- інерційного ЗТ;
- ЗТ з перемішуванням металу;
- високочастотного зварювання (ВЧЗ);
- три способи ВЧЗ;
- зварювання вибухом (ЗВ);
- магнітно-імпульсного зварювання (МІЗ).

### 7. Устаткування, переваги, недоліки та область використання:

- холодного зварювання (ХЗ);
- ХЗ з деформацією зсуву;
- ультразвукового зварювання (УЗЗ);
- зварювання тертям (ЗТ) за класичною схемою;
- інерційного ЗТ;
- ЗТ з перемішуванням металу;
- високочастотного зварювання (ВЧЗ);
- три способи ВЧЗ;
- зварювання вибухом (ЗВ);
- магнітно-імпульсного зварювання (МІЗ).

8. Обґрунтуйте, який із типів структури з'єднань необхідно забезпечувати при ЗВ сталі з алюмінієвим сплавом.

9. Обґрунтуйте, при якому виді виробництва найбільш ефективно використання ВЧЗ.

10. Обґрунтуйте свою думку щодо з'єднання сталей зварюванням тертям з перемішуванням металу.

## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ З НИЗЬКОІНТЕНСИВНОЮ СИЛОВОЮ ДІЄЮ

### 2.1. Дифузійне зварювання у вакуумі

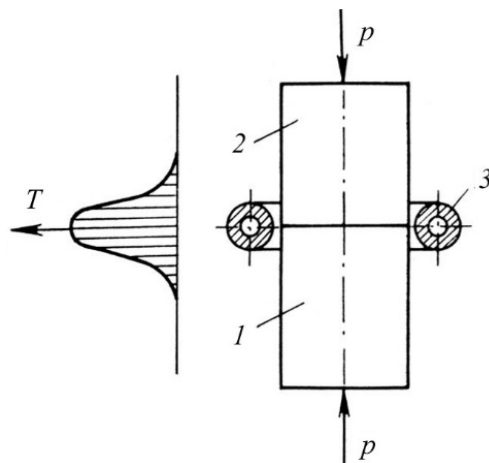
#### 2.1.1. Суть способу

Дифузійне зварювання (*diffusionschweissen, diffusion welding, диффузионная сварка*) – це зварювання тиском, яке здійснюється за рахунок утворення міжатомних зв'язків контактуючих деталей в умовах підвищеної температури і незначної пластичної деформації, що сприяє розвитку дифузійних процесів. Зазвичай зварювання виконують у вакуумі.

З'єднання утворюється в результаті спільної дії температури  $T$  і тиску  $p$  протягом певного часу  $t$ . Час зварювання складає від декількох хвилин до десятків хвилин. Схему дифузійного зварювання показано на рис. 2.1.

Рис. 2.1. Схema дифузійного зварювання і розподілу температури в зоні стику:

1, 2 – деталі; 3 – індуктор для нагрівання деталей



## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

Характерною особливістю традиційного способу дифузійного зварювання у вакуумі (ДЗВ) є використання відносно високих температур нагрівання (зазвичай  $0,6 \dots 0,8 T_{\text{пл}}$ ), низьких тисків, які менші від границі плинності з'єднуваного матеріалу, відповідно малих деформацій, і певної витримки при температурі зварювання. Зближення поверхонь на міжатомні відстані відбувається за рахунок деформації повзучості. Зазвичай ДЗВ ведуть у вакуумі [15, 18, 80], а основними параметрами режиму є температура, тиск і час зварювання.

Дифузійне зварювання у вакуумі розроблено в 1953 р. доктором технічних наук, професором М. Ф. Казаковим. Він запропонував технологічну характеристику процесу, прийняту Міжнародним інститутом зварювання. За цією характеристикою дифузійне зварювання матеріалів у твердому стані – це спосіб отримання монолітного з'єднання, що утворюється внаслідок виникнення міжатомних зв'язків у результаті зближення контактних поверхонь за рахунок локальної пластичної деформації при підвищеній температурі, яка забезпечує взаємну дифузію в поверхневих шарах з'єднуваних матеріалів [80].

Дифузійне зварювання застосовують для з'єднання як однорідних, так і різнорідних матеріалів, що мають різні фізико-механічні властивості (ФМВ). Температура зварювання здебільшого складає  $0,6 \dots 0,8$  температури плавлення (за абсолютною шкалою) металу, що зварюється, або більш легкоплавкого в різнорідних з'єднаннях.

Для традиційної схеми ДЗВ однорідних металів властива наявність усіх трьох стадій зварювання у твердому стані: утворення фізичного контакту поверхонь, їх активація та об'ємна взаємодія.

Утворення фізичного контакту при ДЗВ відбувається при низькоінтенсивній дії за рахунок деформації повзучості.

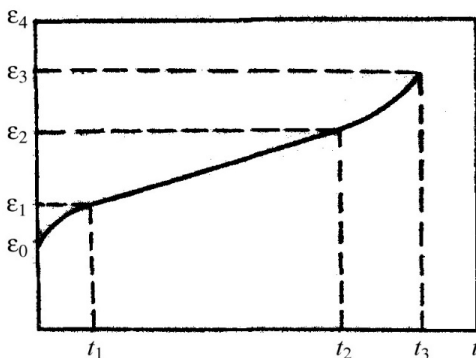


Рис. 2.2. Крива повзучості металу

Повзучість – пластична деформація металу при постійному напруженні, меншому від границі плинності, що розвивається при підвищеній температурі і залежить від часу. Цю залежність (крива повзучості) показано на рис. 2.2.

Деформація  $\epsilon_0$  виникає відразу при навантаженні і поєднує в собі пластичну і пружну деформації. В інтервалі часу від 0 до  $t_1$

швидкість повзучості поступово зменшується. Цей період повзучості називається *першою* або *неусталеною стадією повзучості*. Між деформаціями  $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_2$ , тобто в період від  $t_1$  до  $t_2$ , швидкість повзучості практично постійна. Цей період називається *другою* або *усталеною стадією повзучості*.

Після деформації  $\varepsilon_2$  швидкість повзучості постійно підвищується до деформації  $\varepsilon_p$  і руйнування металу. Період зростаючої швидкості повзучості називається *третьою стадією повзучості*. Для зварювання практичний інтерес представляють тільки перші дві стадії повзучості.

Залежно від температури і рівня діючих напружень характер кривих повзучості змінюється. При низьких напруженнях і високих температурах повзучість металу починається з другої стадії.

Макроскопічна деформація повзучості часто характеризується як пластична, а пружною деформацією і в'язким плином нехтують. На мікроскопічному рівні пластична деформація включає у себе утворення ліній ковзання, смуг ковзання, смуг деформації, складок і комірчасті структури. На субмікроскопічному рівні пластична деформація включає у себе процеси зародження, руху, розмноження і взаємодії дислокацій.

Повзучість є термічно активованим процесом. Локальне термічне збудження забезпечує додаткову енергію понад введено механічним шляхом, що призводить до подолання опору деформації повзучості. На основі теорії термодинамічної флуктуації швидкість повзучості  $\dot{\varepsilon}$  в загальному вигляді може бути подана рівнянням [5]

$$\dot{\varepsilon} = \sum Z_i(\nu, T, S) \sigma_i(T, S) \exp\left(-\frac{\Delta H_i(T, S)}{RT}\right),$$

де функція  $Z_i$  залежить від температури  $T$  і містить частоту  $\nu$  коливань, зміну ентропії і структурний фактор  $S$ . Останній включає в себе такі характеристики мікроструктури, як величина зерна, величина і розподіл частинок однієї чи більше фаз, густини, розподіл та довжина дислокацій. Функція  $\sigma_i$  залежить від температури і структури, оскільки механізми повзучості є чутливими до температури і структури металу. Величина  $\Delta H_i$  є дійсною енергією активації для  $i$ -го процесу, який визначає швидкість повзучості та залежить від температури і структури. Якщо діючий механізм, що контролює повзучість у визначених межах температури, напружень і структури, невідомий, то невідомі і точні види функцій  $Z_i$  і  $\sigma_i$ , а отже і величина  $\Delta H_i$  не може бути точно визначена. Однак, підтримуючи  $Z_i$  і  $\sigma_i$  постійними, можна визначити уявну енергію активації



## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

повзучості  $\Delta H_{\text{п}}$ , в яку можуть входити також інші члени, крім  $\Delta H_i$ , і яка буде наближатися до  $\Delta H_i(T, S)$ . Порівнюючи  $\Delta H_{\text{п}}$  і  $\Delta H_i$  для можливих механізмів, можна визначити, який із механізмів контролює процес повзучості.

Повзучість металів поділяють на *низькотемпературну* і *високотемпературну*. При цьому вважають, що *швидкість низькотемпературної повзучості визначається механізмами, не пов'язаними з дифузією, наприклад поперечним ковзанням, перетином дислокацій, тертям у ґратках, обумовленим силами Пайєрлса. Швидкість високотемпературної повзучості контролюється дифузійними процесами*. Встановлено, що для багатьох металів таким процесом є самодифузія. Важливим процесом при усталеній повзучості є рух вакансій. Типи та механізми деформації повзучості детально розглянуто в роботі [5].

$$\dot{\epsilon} = Bp^m \exp\left(-\frac{\Delta H_{\text{п}}}{RT}\right) \text{ або } \dot{\epsilon} = C_1 p^{C_2} \cdot e^{-\frac{C_3}{T}}, \quad (2.1)$$

де  $B = C_1$  – постійна, що визначається природою матеріалу;  $p$  – діючі напруження (тиск при зварюванні);  $m = C_2$  – постійна, що залежно від матеріалу звичайно змінюється від 3 до 5;  $\Delta H_{\text{п}}$  – енергія активації повзучості, яка визначається при дослідженні повзучості в умовах зварювання;  $\frac{\Delta H_{\text{п}}}{R} = C_3$ .

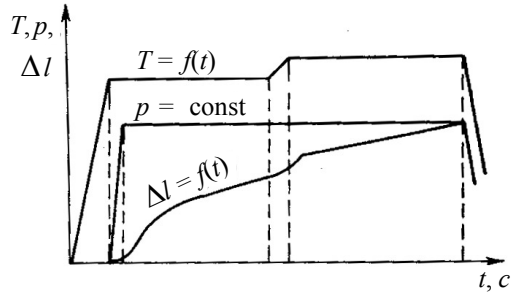
Для визначення часу утворення фізичного контакту необхідно мати криві повзучості металу в умовах ДЗВ, за якими визначають параметри повзучості, що входять у рівняння (2.1), а також необхідну величину деформації залежно від способу обробки з'єднуваних поверхонь. Їх можна розраховувати за даними фізики твердого тіла та моделювання форми виступів на поверхнях відповідно, але реальні значення дають експериментальні результати.

Для апроксимації експериментальних кривих повзучості на усталеній стадії при температурі  $T$  використовується рівняння (2.1).

Одним з експериментальних методів визначення енергії активації повзучості є метод малих стрибків температури, при якому проводять дослідження повзучості [5]. Повзучість досліджують при постійних напруженні і температурі  $T_1$ , а потім різко змінюють температуру до  $T_2$ , яка може бути нижчою або вищою від  $T_1$ . Схему зміни параметрів випробувань показано на рис. 2.3.

## 2. 1. Дифузійне зварювання у вакуумі

Рис. 2.3. Схема зміни параметрів процесу повзучості при визначенні енергії активації за методом малих стрибків температури



Зі співвідношення швидкостей повзучості безпосередньо перед зміною температури і після неї визначають  $\Delta H_{\text{п}}$ :

$$\Delta H_{\text{п}} = \frac{RT_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1},$$

де  $\dot{\epsilon}$  і  $\dot{\epsilon}_1$  — швидкості усталеної повзучості відповідно при температурах  $T_2$  і  $T_1$ .

При визначенні параметрів повзучості спочатку знаходять енергію активації повзучості за методом малих стрибків температури. Провівши експеримент при постійній температурі і різних тисках, визначають коефіцієнт  $m$ , а потім розраховують решту коефіцієнтів за серією кривих повзучості [22]. Наприклад, такі криві показано на рис. 2.4.

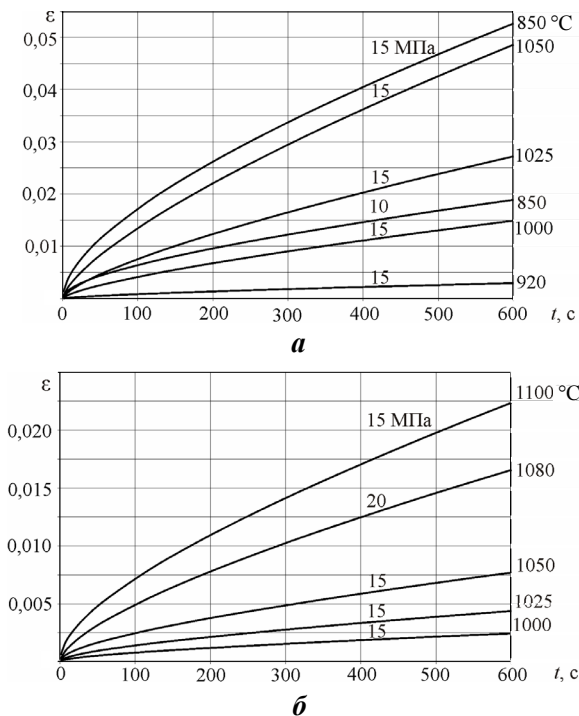


Рис. 2.4. Криві повзучості сталей 10895 (а) і 12Х18Н10Т (б)

## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

Цифри на рис. 2.4 показують температуру повзучості і діючий тиск. Параметри повзучості визначаються для певних температурних інтервалів, в яких механізми повзучості однакові, а параметри повзучості змінюються мало.

Для розрахунку величини деформацій при дифузійному зварюванні доцільно враховувати першу та другу стадії повзучості. Досвід моделювання напружено-деформованого стану при ДЗВ показав, що для цього можна використовувати рівняння

$$\varepsilon = C_1 p^{C_2} \frac{t^{C_3+1}}{C_3+1} \exp\left(-\frac{C_4}{T}\right) + C_5 p^{C_6} t \exp\left(-\frac{C_7}{T}\right), \quad (2.2)$$

де  $C_1 \dots C_7$  – коефіцієнти, які визначаються з експериментальних кривих повзучості, при цьому  $C_1 > 0$ ;  $C_2 = m_{(1)}$ ;  $C_4 = (\Delta H_{n(1)}/R)$ ;  $C_5 > 0$ ;  $C_6 = m_{(2)}$ ;  $C_7 = (\Delta H_{n(2)}/R)$ , інші позначення ті ж, що в рівнянні (2.1).

У рівнянні (2.2) перший доданок дає величину деформації на першій стадії, другий – на другій стадії. Індокси біля коефіцієнтів  $m$  та енергії активації повзучості  $\Delta H_n$  означають першу і другу стадії відповідно.

**Основними способами активації поверхонь при ДЗВ** є термічна, деформаційна, хімічна. В окремих випадках використовують електростатичне поле, радіаційну обробку, ультразвукові коливання, розчинення оксидних і хемосорбованих плівок у розплаві із видаленням їх зі стику тощо.

Вакуум при дифузійному зварюванні сприяє активації поверхонь завдяки процесам дисоціації і сублімації оксидів, а також відновленню металу з утворенням газової фази, оскільки газоподібні продукти цих процесів безперервно видаляються вакуумними насосами.

Дисоціація оксидів відбувається, якщо відповідно до принципу рухомої рівноваги, парціальний тиск кисню в зовнішньому середовищі  $\{P_{O_2}\}$  менший, ніж пружність дисоціації оксиду  $P_{O_2}$  (окс):

$$\{P_{O_2}\} < P_{O_2} \text{ (окс)}.$$

Парціальний тиск кисню в атмосферному повітрі складає  $2,1 \cdot 10^4$  Па. В аргоні вищого сорту вміст кисню не більше 0,0007 %, тобто при атмосферному тиску аргону парціальний тиск кисню не більше  $7 \cdot 10^{-1}$  Па.

У вакуумі парціальний тиск кисню суттєво зменшується. Залежно від тиску залишкової атмосфери розрізняють низький вакуум – від атмосферного тиску до  $10^3$  Па, середній – до 1 Па, високий –  $10^{-1} \dots 10^{-4}$  Па і надвисокий –  $10^{-5} \dots 10^{-10}$  Па. Зазвичай зварювання виконують у високому вакуумі біля  $10^{-1} \dots 10^{-2}$  Па. Якщо вважати, що склад залишкової атмосфери

## 2. 1. Дифузійне зварювання у вакуумі

в робочій камері відповідає складу повітря, то парціальний тиск кисню при вакуумі  $10^{-1}$  Па дорівнює  $2 \cdot 10^{-2}$  Па. У роботах Г.В. Конюшкова, Н.Ф. Казакова і С.А. Жукова маспектрометричним методом установлено, що при використанні паромасляного дифузійного насоса склад залишкової атмосфери не відповідає складу повітря і парціальний тиск кисню дорівнює  $4 \cdot 10^{-7}$  Па [29].

Надзвичайно важливу роль відіграє також величина натікання повітря і відповідно кисню в робочу камеру. Якщо в робочу камеру повітря не натікає, то по мірі витрати кисню процес його взаємодії навіть з найбільш активними елементами сповільнюється, припиняється, коли парціальний тиск кисню зменшиться до пружності дисоціації оксиду, а надалі можливий процес дисоціації оксиду. При цьому слід зазначити, що видалення газової фази, у тому числі продуктів реакції, у вакуумних установках іде безперервно. Таким чином, важливими характеристиками будь-якої вакуумної системи є не лише її продуктивність і граничний вакуум, а і величина натікання.

Пружність дисоціації оксидів деяких елементів при температурах  $1000 \dots 1300$  °С наведено на рис. 2.5.

Пружність дисоціації оксидів елементів є мірою їх спорідненості до кисню, що визначає процеси окиснення елементів та дисоціації оксидів. Чим менше пружність дисоціації оксиду, тим більші спорідненість елементу до кисню і термодинамічна стійкість оксиду. Для всіх елементів з рис. 2.5, крім вуглецю, константа рівноваги  $K_p$  визначається тільки парціальним тиском кисню. Для реакції окиснення вуглецю  $K_p$  визначається рівнянням

$$K_p = \frac{P_{CO}^2}{P_{O_2}}$$

тобто парціальними тисками кисню і продукту реакції – газу CO. Оскільки у вакуумі парціальний тиск чадного газу не більше  $5 \cdot 10^{-6}$  Па

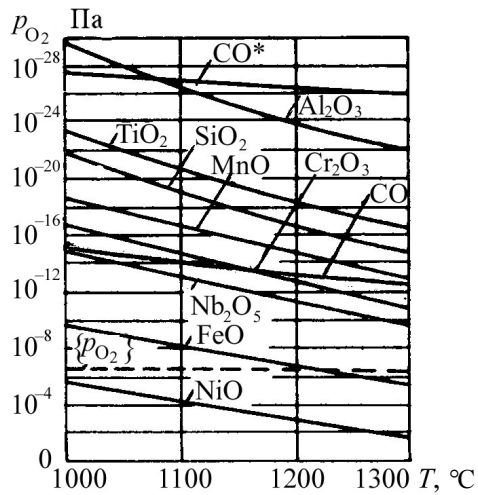


Рис. 2.5. Пружності дисоціації оксидів деяких елементів залежно від температури

## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

і безперервно видаляється, то спорідненість вуглецю до кисню значно зростає (пружність дисоціації газу на рис. 2.5 позначено  $\text{CO}^*$ ). Тому при температурах вище  $1100^\circ\text{C}$  у вакуумі вуглець має найбільшу спорідненість до кисню, що забезпечує очищення металів від оксидів.

Іншим механізмом термічного видалення оксидної плівки може бути її сублімація. Умовою сублімації є перевищення тиску насиченої пари (пружності пари) оксиду  $P_{i\text{ окс}}^0$  при даній температурі над парціальним тиском пари того ж оксиду  $\{P_{i\text{ окс}}\}$  в зовнішньому середовищі:

$$P_{i\text{ окс}}^0 > \{P_{i\text{ окс}}\}.$$

Тиски насичених парів оксидів деяких металів показано на рис. 2.6.

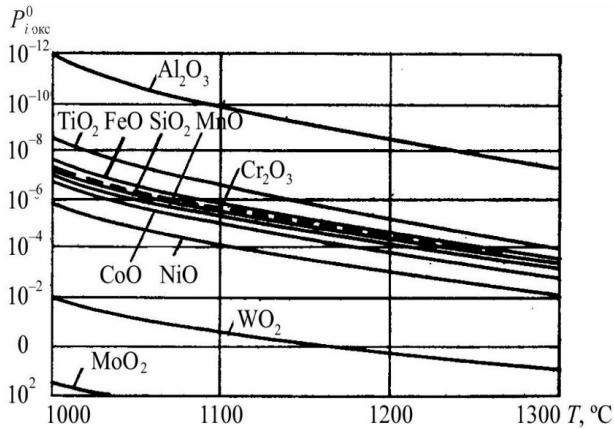


Рис. 2.6. Тиски насичених парів оксидів деяких елементів залежно від температури

Оскільки процеси сублімації і дисоціації оксидів між собою пов'язані, можливий поступовий перехід вищих оксидів у нижчі і в паровій фазі може бути декілька оксидів даного елемента з різною стехіометрією, то на рис. 2.6 для таких оксидів наведено сумарний тиск всіх компонентів. Більш детальне уявлення про ці процеси дають ізотерми загального та парціальних тисків компонентів над оксидами.

Швидкість сублімації оксиду визначається за рівнянням

$$v_i = 4,4 \cdot 10^{-4} \left[ P_{i\text{ окс}}^0 - \{P_{i\text{ окс}}\} \right] \sqrt{\frac{M_i}{T}}, \quad (2.3)$$

де  $v$  – швидкість сублімації,  $\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ ;  $P_{i\text{ окс}}^0$  – тиск насиченої пари оксиду при температурі сублімації, Па;  $\{P_{i\text{ окс}}\}$  – парціальний тиск пари оксиду

## 2. 1. Дифузійне зварювання у вакуумі

в зовнішньому середовищі, Па;  $M$  – грам-молекулярна маса речовини;  $T$  – температура, К. Для сублімації у вакуумі, коли пари речовини безперервно видаляються, приймають  $P_{i \text{ окс}}^0 - \{P_{i \text{ окс}}\} \approx P_{i \text{ окс}}^0$ .

Вплив температури на швидкість сублімації оксидів деяких елементів, розраховану за рівнянням (2.3), показано на рис. 2.7.

Знаючи швидкість сублімації оксидів, можна визначити час їх видалення залежно від товщини плівки.

Теоретично встановлено та експериментально підтверджено, що оксиди молібдену, вольфраму, міді, нікелю сублімуються при температурах зварювання у вакуумі, а оксид  $\text{MoO}_3$  – навіть на повітрі вище  $600^\circ\text{C}$ . Найбільш важко видаляються термодинамічно міцні оксиди, зокрема оксиди алюмінію, цирконію та хемосорбований кисень на перехідних металах.

Для процесів сублімації також необхідно мати якомога менше натікання повітря в робочу камеру. При відсутності натікання кисню та безперервному видаленні парів оксидів, згідно з принципом рухомої рівноваги, процес сублімації може проходити до повного видалення оксиду. Експериментальні дослідження авторів показали, що термодинамічно стійкі оксидні плівки на жароміцних нікелевих сплавах видаляються при температурах нагрівання  $1150 \dots 1200^\circ\text{C}$  у вакуумі  $6 \cdot 10^{-3}$  Па і натіканні не більше  $3 \cdot 10^{-5}$  Па·м<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup>. Якщо окиснити поверхню сплаву таким чином, щоб було видно оксидну плівку по кольору, то після нагрівання поверхня стає світлою (рис. 2.8).

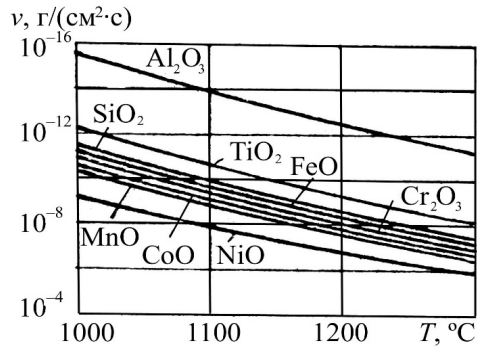
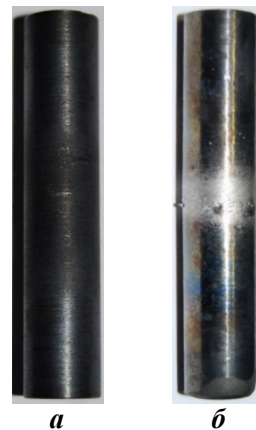


Рис. 2.7. Залежність швидкості сублімації оксидів деяких елементів від температури

Рис. 2.8. Вигляд поверхні сплаву ЧС88У з попередньо окисненою поверхнею (а) та після нагрівання у зоні стику (б) при ДЗВ до температури  $1150^\circ\text{C}$  протягом 6 хв у вакуумі  $6 \cdot 10^{-3}$  Па при натіканні  $3 \cdot 10^{-5}$  Па·м<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup>



## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

При нагріванні металів у високому вакуумі та низькому натіканні газів у робочу камеру ефективним є ще один термічно активований механізм видалення оксидних плівок – їх розчинення в основному металі. Наприклад, оксидна плівка на титані активно розчиняється при температурі вище 700 °С. Для розчинення оксидних плівок товщиною 50 Å (5 нм) на нікелі і міді при температурі 1000 °С потрібні секунди. На цьому механізмі базується також використання гетерів, що поглинають гази. Ефективність механізму розчинення газів і оксидів підтверджують розроблені автовакуумні технології з'єднання металів.

Захисне середовище при паянні необхідне не лише для забезпечення самого процесу, але і для виключення негативного впливу кисню та інших газів на властивості і склад основного металу.

Як відзначалося вище, парціальний тиск кисню у вакуумі набагато менший, ніж в інертних газах. Наприклад, якщо використовувати зварювання в аргоні вищого сорту, який містить до  $7 \cdot 10^{-4}$  % (об.) кисню, то парціальний тиск кисню складає  $7 \cdot 10^{-1}$  Па, що на шість порядків більше, ніж у вакуумі  $10^{-1}$  Па. Крім цього, аргон містить до  $7 \cdot 10^{-3}$  г/м<sup>3</sup> водяної пари при 20 °С, що вимагає ретельного очищення газу від вологи.

Високі захисні властивості вакууму підтвержені експериментально при зварюванні активних і тугоплавких металів, які різко змінюють свої властивості при взаємодії з газами. Наприклад, твердість титану і цирконію при плавленні у вакуумі в два рази нижча, а пластичність вища, ніж в контрольованому інертному середовищі.

Багаторічний досвід ДЗВ у високому та надвисокому вакуумі особливо відповідальних виробів показав, що вакуум є найбільш досконалим захисним середовищем. Він є захисним середовищем при електронно-променевому зварюванні, високотемпературному паянні жароміцних сплавів, високоактивних та інших металів і сплавів, а також широко застосовується в металургії.

Дифузійне зварювання може виконуватися також у захисних середовищах або в активованому аргоні. Для його активації можна застосовувати водень, чадний газ СО, але найбільш ефективним є хлористий водень, фтористий водень або амоній. Фтористий амоній за стандартних умов являє собою білий порошок, який при нагріванні розпадається без будь-якого залишку з утворенням фтористого водню та аміаку, що в присутності каталізатора при температурі 600 °С також дисоціює на азот і водень.

При взаємодії оксиду металу з фтористим воднем утворюється леткий фторид металу і водяний пар, необхідний для цієї реакції. Прискорює реакцію вуглець.

## 2. 1. Дифузійне зварювання у вакуумі

Слід відзначити, що активатори застосовують не лише в інертному середовищі, а і у вакуумі, якщо тиск та натікання в робочій камері не забезпечують активації поверхні.

**Об'ємна взаємодія однорідних металів** призводить до усунення фізичних і хімічних недосконалостей будови металу в зоні стику за рахунок дифузійних процесів, утворення спільних зерен з'єднаних деталей, релаксації напружень тощо.

При з'єднанні однойменних металів об'ємна взаємодія поліпшує експлуатаційні характеристики з'єднань. При з'єднанні різнойменних металів характер об'ємної взаємодії визначається їх природою та діаграмою стану. При цьому можливе утворення перехідної зони, що складається з твердих розчинів, обмежених твердих розчинів з інтерметалідами або евтектоїдами при пересиченні твердого розчину, з інтерметалідів, шпінелей тощо. Якщо з'єднані матеріали утворюють крихкі перехідні прошарки, то процес об'ємної взаємодії необхідно пильно контролювати та обмежувати. В об'ємній взаємодії матеріалів головну роль відіграють процеси **дифузії і рекристалізації**.

**Дифузія** – процес довільного переміщення атомів на відстані, більші від параметра ґратки, що супроводжується переносом речовини.

При дифузійному зварюванні дифузія зазвичай розглядається в одному вимірі по осі  $x$  – перпендикулярно до стику, яка описується *другим рівнянням Фіка*:

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2C}{dx^2}, \quad (2.4)$$

де  $C$  – концентрація елемента, що дифундує;  $D$  – коефіцієнт дифузії;  $t$  – час дифузії.

Розв'язок рівняння (2.4) визначається початковими і граничними умовами. Стосовно ДЗВ зазвичай використовують розв'язок для дифузії в напівнескінченне тіло або при застосуванні тонких прошарків – для дифузії з обмеженого джерела речовини. Коефіцієнт дифузії  $D$  у рівнянні (2.4) залежить від концентрації та інших факторів, але для аналізу закономірностей впливу температури, початкових концентрацій елемента, часу дифузії та інших факторів застосовують більш просте рішення, приймаючи  $D$  постійним.

Вплив температури визначається через коефіцієнт дифузії  $D$  за рівнянням

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q_D}{RT}\right), \quad (2.5)$$



## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

де  $D_0$  – константа речовини, що дифундує;  $Q_d$  – енергія активації дифузії;  $R$  – універсальна газова стала;  $T$  – температура, К.

Розв'язання рівняння (2.4) для дифузії з обмеженою кількістю дифундуючої речовини  $C_0 h$  з прошарку товщиною  $h$  для симетричного потоку з центром 0 у центрі прошарку має вигляд

$$C_{(x,t)} = \frac{C_0 h}{2\sqrt{\pi D t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 D t}\right). \quad (2.6)$$

Рівняння (2.6) дозволяє визначити концентрацію речовини в будь-якій точці при будь-якому часі дифузії. Концентрація цієї речовини в центрі прошарку завжди є максимальною:

$$C_{(0,t)} = \frac{C_0 h}{2\sqrt{\pi D t}}. \quad (2.7)$$

Час досягнення допустимої концентрації ( $C_{(0,t)}$ ) речовини в центрі прошарку при початковій концентрації  $C_0$  і коефіцієнті дифузії  $D$  (для даної температури) визначається рівнянням

$$t = \left(-\frac{C_0}{C_{(0,t)}}\right)^2 \cdot \frac{h^2}{4\pi D}.$$

Схему стикового з'єднання, отриманого ДЗВ нікелю з тонким прошарком міді (обмежене джерело дифундуючої речовини), та розподіл міді через певний час дифузії при температурі зварювання показано на рис. 2.9.

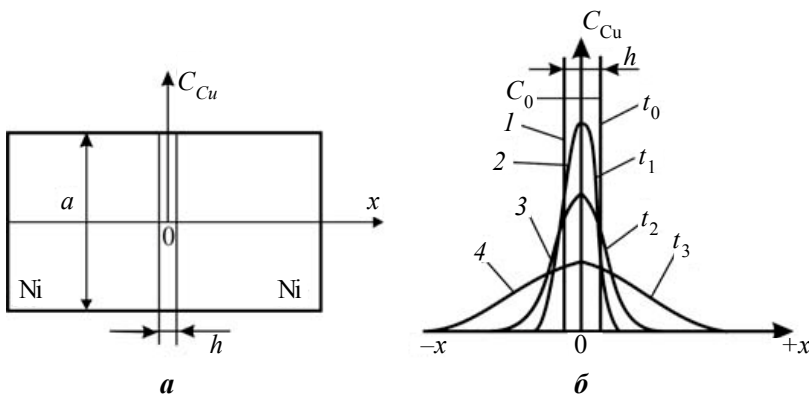


Рис. 2.9. Схema стикового з'єднання нікелю з тонким прошарком міді (а) та розподіл міді через певний час дифузії в нікель при температурі ДЗВ:

$$1 - t_0 = 0; 2 - t_1 > t_0; 3 - t_2 > t_1; 4 - t_3 > t_2$$

## 2. 1. Дифузійне зварювання у вакуумі

З рівняння (2.7) видно, що час досягнення необхідної концентрації елемента в перерізі з'єднання при  $x = 0$  обернено пропорціональний коефіцієнту дифузії, що має експоненціальну залежність від температури, та збільшується прямо пропорціонально квадрату відношення концентрацій елемента в прошарку і допустимої в з'єднанні.

Важливо знати, при яких товщинах у центрі прошарку можливе зменшення концентрації речовини до допустимої при вибраних режимах ДЗВ, зокрема часу зварювання. Товщина прошарку в цьому випадку визначається рівнянням

$$h = 2 \left( \frac{C_{(0,t)}}{C_0} \right) \sqrt{\pi D t}.$$

При збільшенні товщини прошарку  $h$  в 2 рази час дифузії збільшується в 4 рази, при зменшенні  $h$  в 4 рази  $t$  зменшується в 16 разів і т. д.

Розрахунок дифузійних процесів при ДЗВ різнорідних металів проводять за рівнянням (2.4) для дифузії в напівнескінченне тіло.

Напівнескінченними вважаються тіла, в яких при дифузії є переріз з початковою концентрацією дифундууючої речовини. Наприклад, якщо глибина дифузії дорівнює 20 мкм, то тіло більшого розміру по напрямку дифузії може вважатися напівнескінченним для даного випадку дифузії. Розмір тіла, з якого відбувається дифузія, також повинен мати переріз, де зберігається початкова концентрація. Коли ця умова не виконується, то приймається схема дифузії з обмеженою кількістю речовини (див. рівняння (2.6)).

Для дифузії в напівнескінченне тіло рівняння (2.4) аналітичного рішення немає. Розподіл дифундууючого елемента визначається через функцію Крампа  $erf(z)$  за рівнянням

$$C_{(x,t)} = \frac{C_0}{2} [1 - erf(z)], \quad (2.8)$$

де  $erf(z)$  – функція Крампа або функція помилок Гаусса. Параметр функції Крампа визначається за рівнянням

$$z = \frac{x}{2\sqrt{Dt}}. \quad (2.9)$$

Схему стикового з'єднання, отриманого ДЗВ нікелю і міді, та розподіл міді при її дифузії в нікель показано на рис. 2.10.

## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

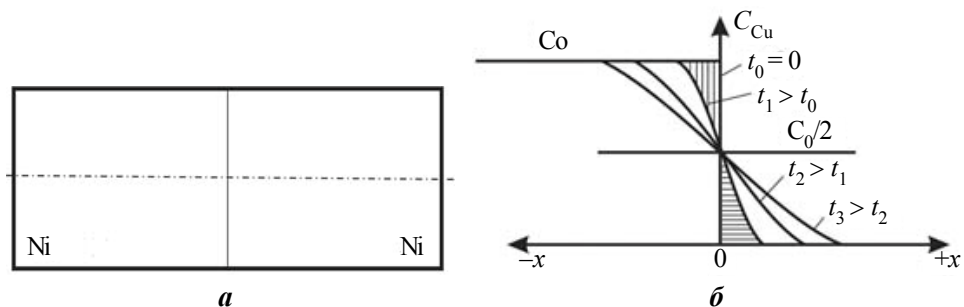


Рис. 2.10. Схема стикового з'єднання нікелю з міддю (а)  
і розподіл міді при її дифузії в нікель (б)

Початок координат знаходиться в стикі. Значення функції Крампа наведено в табл. 2.1.

*Таблиця 2.1. Значення функції Крампа залежно від параметра  $z$*

$z$	$erf(z)$	$z$	$erf(z)$	$z$	$erf(z)$
0	0	0,55	0,5633	1,3	0,9340
0,025	0,0282	0,60	0,6039	1,4	0,9523
0,05	0,0564	0,65	0,6420	1,5	0,9661
0,10	0,1125	0,70	0,6778	1,6	0,9763
0,15	0,1680	0,75	0,7112	1,7	0,9838
0,20	0,2227	0,80	0,7421	1,8	0,9890
0,25	0,2763	0,85	0,7707	1,9	0,9928
0,30	0,3286	0,90	0,7990	2,0	0,9953
0,35	0,3794	0,95	0,8209	2,2	0,9981
0,40	0,4284	1,0	0,8427	2,4	0,9993
0,45	0,4755	1,1	0,8802	2,6	0,9998
0,50	0,5205	1,2	0,9103	2,8	0,9999

Функція  $erf(z)$  змінюється від  $+1$  до  $-1$  та зберігає знак параметра  $z$ . При  $x = 0$  концентрація дифундуючої речовини дорівнює  $C_0/2$ , оскільки дифузія іде до вирівнювання концентрацій на границі тіл. Для наближених розрахунків функцію  $erf(z)$  можна приймати рівною параметру  $z$  при його абсолютному значенні, меншому  $0,65$ , і рівною одиниці при значенні  $z$ , більшому  $1,8$ .

**Рекристалізація** – процес підвищення структурної однорідності і зменшення вільної енергії металів і сплавів у межах фази, який відбувається шляхом утворення та руху або тільки руху границь з великими кутами розорієнтування при нагріванні до певної температури деформованого металу. Деформований метал накопичує близько  $10...15\%$  енергії, витраченої на деформацію, у вигляді підвищеної енергії зміщених

атомів, дислокацій, напружень тощо. Процеси рекристалізації полягають у зміні одних зерен іншими тієї ж фази, але з меншою енергією.

Усунення структурних дефектів, викликаних пластичною деформацією, при нагріванні відбувається шляхом елементарних процесів, які проходять з різною швидкістю, у різних температурних інтервалах і з різною енергією активації. До елементарних процесів належать дифузія точкових дефектів і їх стік, перерозподіл дислокацій і їх кристалічна переорієнтація, формування малокутових і міжзеренних великокутових границь із поглинанням дефектів, які сприяють утворенню в стику спільних зерен і внутрішньокристалітних міжатомних зв'язків. Ці процеси відбуваються послідовно, або накладаються один на одного, залежно від ступеня і характеру деформації, температури, швидкості та тривалості нагрівання. Розрізняють дві стадії усунення наслідків деформації:

- повернення (*відпочинок, полігонізація*);
- рекристалізація (*первинна, збірна, вторинна*).

До початку рекристалізації відбувається повернення, що включає зменшення концентрації точкових дефектів і перерозподіл дислокацій без утворення нових границь (*відпочинок*) або з утворенням і міграцією малокутових границь (*полігонізація*).

*Відпочинок* є першою стадією, на якій зменшуються кількість вакансій, густина дислокацій, величини напружень.

*Полігонізація* – найбільш низькотемпературний процес з вираженою зміною структури, при якому відбуваються процеси переповзання дислокацій, утворення їх "стінок", що ділять зерна на частинки (субзерна, полігони) розміром  $10^{-6} \dots 10^{-4}$  см. "Стінки" утворюються дислокаціями одного знака.

Енергія деформованого кристала включає у себе енергію дислокацій та енергію взаємного відштовхування дислокацій одного знака. При відпалі дислокації частково перегруповуються та анігілюють. Поля напружень надлишкових дислокацій і їх взаємодія призводять до утворення дислокаціями границь ("стінок") дислокацій одного знака. Ці границі перпендикулярні до площини ковзання.

Під *полігонізацією* розуміють такий перерозподіл дислокацій, при якому утворюються області кристала, які вільні від дислокацій і відділені одна від іншої дислокаційними границями. Дислокації, витягуючись у плівки, виявляються у вигляді ямок травлення на поверхні, перпендикулярній до зсувного напруження, яке діяло при деформації.

Полігонізація має багато спільного з рекристалізацією. Обидва процеси пов'язані з перерозподілом дислокацій і утворенням нових границь.

## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

Нагрівання сильно деформованого металу до температури, при якій можливий перерозподіл дислокацій, призводить до рекристалізації. Полігонізація в такому матеріалі майже не виявляється. Якщо матеріал несильно деформований, то в ньому можна викликати полігонізацію при нагріванні до більш низької температури або рекристалізацію при нагріванні до більш високої температури.

Швидкість процесу полігонізації та енергія активації залежать від стану матеріалу і зовнішніх умов. Якщо полігонізація проходить у малодеформованому металі і без напружень, то сумарна енергія активації процесу полігонізації дорівнює сумі енергій утворення сходинки, вакансії і її міграції та самодифузії.

Якщо вакансій і сходинок багато, наприклад при нагріванні під напруженням (повзучість, втома), то швидкість полігонізації визначається тільки міграцією вакансій. Якщо полігонізація проходить у сильно деформованому металі, але без значних напружень, тобто є багато дислокаційних сходинок, то процес визначається швидкістю самодифузії.

Процес полігонізації може бути настільки інтенсивним, що виникають не тільки малокутові, але й висококутові границі.

*Рекристалізація* – процес, при якому відбувається найбільш істотне зниження енергії та зміна структури деформованого металу за рахунок зменшення числа її дефектів.

При рекристалізації сильнодеформованого металу можна спостерігати, як виникають дуже малі зерна, які далі ростуть за рахунок деформованої структури аж до взаємного зіткнення. Зазначений процес характеризується зародженням і ростом зерен і називається *первинною рекристалізацією*. Подальший відпал, особливо при високих температурах, може викликати нове збільшення розмірів зерен, отриманих при первинній рекристалізації. Процеси, які проходять при цьому, поєднують під загальним терміном – ріст зерна.

*Первинна рекристалізація* в деформованому металі супроводжується утворенням центрів рекристалізації, тобто ділянок з неспотвореними або слабо спотвореними ґратками, відділеними границями з великими кутами розорієнтації.

При *вторинній і збірній рекристалізаціях* окремі центри ростуть і укрупнюються. Вторинна і збірна рекристалізація відрізняються тим, що при вторинній рекристалізації є зерна, які здатні рости набагато швидше, ніж інші. При збірній рекристалізації таких зерен немає.

Первинна рекристалізація починається при нагріванні металу, попередньо деформованого до визначеного ступеня. Така деформація називається *критичною*.

Нові зерна ростуть після деякого інкубаційного періоду, який залежить від ступеня деформації і температури. На відміну від повернення, швидкість рекристалізації в початковий момент дорівнює нулю, потім збільшується, проходячи через максимум.

Швидкість первинної рекристалізації визначається швидкістю зародження центрів рекристалізації  $N$  і швидкістю росту кристалітів  $G$ .

Залежність швидкості росту кристалітів від температури при постійній деформації визначається рівнянням

$$G = G_0 \exp\left(-\frac{Q_G}{RT}\right),$$

де  $Q_G$  – енергія активації росту кристалітів;  $G_0$  – постійна.

Тривалість рекристалізації з підвищенням температури зменшується, оскільки зі збільшенням температури нагрівання зростають швидкості утворення зародків ( $N$ ) і їх росту ( $G$ ).

Для процесів повернення, пов'язаних з полігонізацією, і рекристалізації істотну роль відіграють чистота металу і наявність у ньому домішок. Чисті метали полігонізуються при нагріванні і далі не рекристалізуються. Наявність вже невеликих концентрацій домішок призводить до того, що полігонізація не встигає пройти і її випереджає рекристалізація.

Підвищення швидкості нагрівання сприяє збільшенню швидкості утворення зерна і здрібнюванню структури до кінця первинної рекристалізації. При ДЗВ з індукційним нагріванням відпочинок не встигає пройти до початку рекристалізації, що полегшує зародження і ріст нових зерен. Мала швидкість нагрівання впливає аналогічно попередньому відпочинку при низьких температурах, що зменшує число зародків рекристалізації.

Збільшення ступеня деформації супроводжується зростанням швидкостей утворення зародків  $N$  і росту зерен  $G$ , а відповідно, зниженням тривалості рекристалізації. Однак оскільки  $N$  зростає швидше ніж  $G$ , то більш сильна деформація дає більш дрібне рекристалізоване зерно.

Збірна рекристалізація або ріст зерен настає після первинної рекристалізації, коли центри рекристалізації, які вирости, стикаються. Рушійною силою процесу є зменшення зернограничної (поверхневої) енергії. Збірна рекристалізація може проходити також до повного завершення первинної.

При рекристалізації границі рухаються до центрів своєї кривизни, щоб наблизити кути в стиках зерен до  $120^\circ$ . Це відбувається за рахунок поглинання зерен з гострими кутами.

Чим сильніше відрізняються кути від  $120^\circ$ , тим швидше йде міграція границь. В однофазному сплаві ріст зерен уповільнюється, коли кути

## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

наближаються до  $120^\circ$ , а число ребер у перетині зерна – до 6. При наявності дисперсних частинок, які є бар'єрами для руху границь, ріст зерен може припинитися на деякий час до накопичення додаткової енергії. Положення границь зерен при зупинці фіксується при вакуумному травленні.

Міграція границь відбувається під впливом незрівноважених сил поверхневого натягу. При цьому приміжові об'єми одних із сусідніх кристалітів знаходяться в стані стискування (наявний надлишок дислокацій або дефіцит вакансій), інші – в стані розтягування (надлишок вакансій). У результаті встановлюється потік вакансій, а у зворотному напрямку – атомів. Так здійснюється *вакансійний механізм міграції границь*.

Границі можуть рухатися стрибкоподібно із затримками біля сторонніх включень (карбіди, оксиди, зміцнювальні фази), тому що для обходу такого включення необхідне збільшення поверхні, а відповідно – енергії (рис. 2.11).

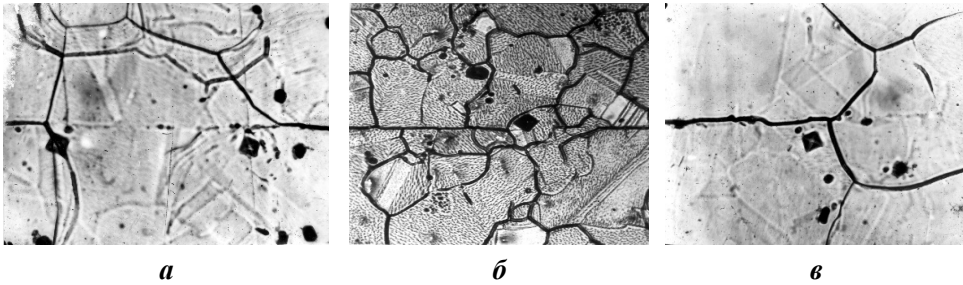


Рис. 2.11. Мікроструктура зварного з'єднання сплаву ЕИ602 після нагрівання без тиску при  $1150^\circ\text{C}$  і вакуумного травлення; *a, в* –  $\times 440$ ; *б* –  $\times 200$

На рис. 2.11 наведено мікроструктуру сплаву ЕИ602 у зоні з'єднання після дифузійного зварювання і вакуумного травлення, на якому видно кілька положень границь при їх міграції. Проміжні положення фіксувалися в момент затримки міграції (див. рис. 2.11,*а*). Колишня площина стику, маючи скупчення фізичних і хімічних недосконалостей, утримує границі зерен. Однак додаткова деформаційна активація металу в зоні стику шляхом вдавлювання алмазної піраміди, як видно з рис. 2.11,*б*, призвела до переміщення границі. На рис. 2.11,*в* видно, що утворені в стику зерна займають більш рівноважні положення з кутами біля  $120^\circ$  в потрійному стику границь.

Швидкість переміщення границі зерна знаходять за формулою

$$G = K \frac{\sigma V}{D} \exp\left(-\frac{Q_G}{RT}\right),$$

## 2. 1. Дифузійне зварювання у вакуумі

де  $V$  – об'єм грам-атома металу;  $D$  – середній діаметр зерна;  $K$  – постійна;  $\sigma$  – поверхнева енергія зерна;  $Q_G$  – енергія активацій міграції границі.

Залежність розміру (діаметра) зерна від часу може бути визначена за емпіричним рівнянням

$$D = ct^n,$$

де  $c$  – постійна, яка залежить від температури;  $n$  – постійна, яка дорівнює 0,5 для чистих металів. Вторинна рекристалізація, як і збірна, відбувається після первинної при нагріванні до більш високих температур.

Процес вторинної рекристалізації супроводжується обов'язковою різнозернистістю, яка може зникнути тільки із завершенням процесу. Таким чином, різнозернистість свідчить про незакінчену вторинну рекристалізацію.

Формування центрів рекристалізації пов'язане з перерозподілом дислокацій. Міграція границь відбувається, принаймні частково, бездифузійним шляхом за рахунок ковзання дислокацій, а також як термічно активований процес переповзання дислокацій. Для активації процесу потрібен певний "інкубаційний" період. При повільному нагріванні і малій деформації відбувається полігонізація. При великій деформації відбувається рекристалізація, а полігонізація практично не проходить.

Для первинної рекристалізації основною причиною росту зародків і міграції границь є різниця в густині дефектів кристалічної будови. Границі мігрують у бік більшої густини дефектів і поглинають їх, залишаючи за собою більш досконалий за будовою метал.

Напрямок руху границі зародка первинної рекристалізації не залежить від положення центру кривизни границь до їхнього зіткнення.

Вибір оптимальних умов зварювання повинен враховувати необхідність обмеження росту зерна і запобігання різнозернистості, що визначається температурою, величиною і швидкістю деформації, часом, хімічним складом і структурою металу. Для вибору оптимальних умов потрібно користуватися діаграмами рекристалізації, які показують спільний вплив деформації і температури на величину зерна. Наприклад, таку діаграму показано на рис. 2.12.

Аналогічні діаграми, побудовані для умов ДЗВ сплаву ЕП99, показали, що максимальна величина зерна досягається при певному тиску, який викликає критичну деформацію, а потім розмір зерна зменшується. З ростом температури зварювання тиск, що викликає критичну деформацію, падає.



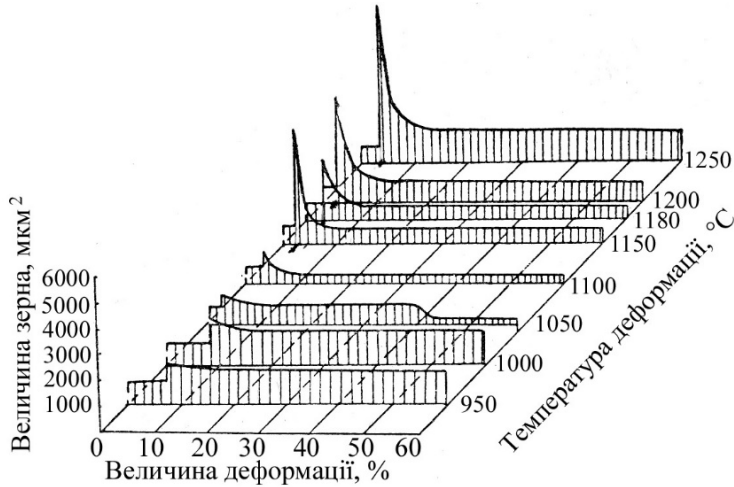


Рис. 2.12. Діаграма рекристалізації сплаву Ni–Cr–Al–Co

В умовах термодформаційного циклу зварювання можна спостерігати також ефект термомеханічної обробки металів. Термомеханічна обробка являє собою сукупність операцій нагрівання, деформації та охолодження (у різній послідовності), у результаті яких формування остаточної структури сплаву, а отже, і його властивостей відбувається в умовах підвищеної густини недосконаlostей кристалічної будови, створених пластичною деформацією.

При пластичній деформації неминуче формування складних скупчень дислокацій. Вони утворюють неправильної форми сітки, комірки, сплетіння, що нерівномірно розподілені по тілу зерна. При такій структурі деформованого металу в умовах підвищеної густини дислокацій їх рух гальмується, що і забезпечує ріст міцності металу, тобто ефект термомеханічної обробки.

Час, необхідний для утворення в стику спільних зерен, залежить від температури і пластичної деформації. На рис. 2.13 показано мікроструктуру з'єднань при дифузійному зварюванні сплаву ЭИ602. На відміну від зразків, мікроструктуру яких подано на рис. 2.11, тиск 22 МПа підтримувався постійно протягом усього часу зварювання (3 хв), а потім зразки швидко охолоджували на повітрі.

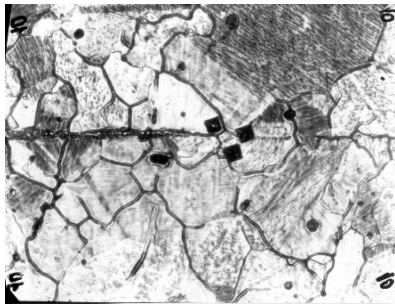


Рис. 2.13. Мікроструктура зварного з'єднання сплаву ЭИ602 після нагрівання під тиском і вакуумного травлення;  $\times 200$

## 2. 1. Дифузійне зварювання у вакуумі

Порівняння мікроструктур показує, що при постійно діючому тиску процес інтенсивного зростання зерна гальмується. На мікроструктурі чітко видно сліди пластичної деформації. Різне забарвлення зерен свідчить про різну орієнтацію блоків, утворення яких відбувається шляхом ковзання всередині зерна. На границях зерен, у тому числі і в зоні стику, виникають зародки нових зерен і утворюються ланцюжки дрібних зерен. На окремих ділянках стику спостерігається утворення дрібних спільних зерен.

При великих пластичних деформаціях текстура деформованого металу впливає на властивості з'єднань, особливо на їх пластичність і ударну в'язкість.

При з'єднанні однорідних матеріалів параметри режиму ДЗВ можуть бути розраховані, виходячи з умов утворення фізичного контакту при повзучості, активації поверхні та об'ємної взаємодії, використовуючи наведені вище рівняння повзучості, швидкості активації та дифузії. У роботах Н.Ф. Казакова [15, 18] і Д.І. Котельнікова [32] прийнято достатньою для забезпечення якісного з'єднання інтегральну ширину дифузійної зони 3...5 мкм. Дифузійні процеси між металами, які з'єднуються, розраховуються для якісної оцінки процесів за рівняннями (2.8) і (2.9) в припущенні, що коефіцієнт  $D$  є постійним (див. рівняння (2.5)).

Дифузійне зварювання різнорідних матеріалів необхідно проводити з урахуванням активації поверхні більш твердого матеріалу і можливості утворення крихких проміжних фаз, що вимагає жорсткого контролю і обмеження дифузійних процесів.

Дифузійне зварювання матеріалів виконується за двома схемами: *без проміжних прокладок і з проміжними прокладками*, які можуть бути у твердому стані або розплавляються при зварюванні. Функції прокладок можуть бути різними. Прокладки *в твердому стані* використовують при зварюванні різнорідних матеріалів, які значно відрізняються за своїми температурними коефіцієнтами лінійного розширення. Застосування прокладок з проміжними ТКЛР дозволяє знизити рівень залишкових напружень у з'єднанні після охолодження. Якщо матеріали, що зварюються, утворюють між собою крихкі інтерметалідні прошарки, то вибирають метал прокладки, який не утворює з ними таких інтерметалідів. Наприклад, при зварюванні сталі з титаном, що утворюють інтерметаліди, застосовують прокладку з ванадію, який має тверді розчини із залізом і титаном.

Широко використовуються високопластичні прокладки з міді, нікелю, алюмінію при з'єднанні твердих матеріалів для формування фізичного контакту та активації поверхні твердого матеріалу при деформації про-

## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

кладки. Пластичні прокладки між різнорідними матеріалами сприяють зниженню власних напружень у з'єднанні, а в однорідних з'єднаннях дозволяють знизити температуру або тиск зварювання.

Поширеним способом ДЗВ з прошарком є використання фольги або порошку, які вносяться в стик між деталями і з'єднуються з ними. Проміжний шар може наноситися на поверхні шляхом електролізу, напилювання у вакуумі, електричного вибуху провідника, модифікації поверхні тощо. Хімічний склад прошарку вибирають залежно від роду матеріалів, які зварюються, і вимог до зварного з'єднання. Товщина проміжного шару може бути різною. При цьому прошарок може цілком змінювати свій склад за рахунок дифузії або зберігатися в стику, що необхідно при зварюванні матеріалів з різними властивостями або металів, які утворюють крихкі з'єднання.

*Дифузійне зварювання виконують також із застосуванням прокладок, які розплавляються.* Їх основним призначенням є активація поверхонь. Вони після змочування поверхонь витісняються, а їх залишки дифундують в основний метал. Розподіл елементів прошарку в основному металі для якісної оцінки розраховується за рівняннями (2.6) і (2.7). Склад металу в зоні зварювання за рахунок дифузійних процесів наближається до складу основного металу. Цей процес застосовується, головним чином, при дифузійному зварюванні жароміцних нікелевих сплавів, що мають термодинамічно стійкі оксидні плівки, які, залишаючись навіть частково в стику, можуть перешкоджати рекристалізації і дифузії та отриманню з'єднань, рівноцінних основному металу за механічними властивостями. Спосіб з'явився на початку 60-х рр. ХХ ст. і став відомим під різними назвами: дифузійне зварювання з прошарками, які розплавляються; пресове зварювання-паяння; TLP-Bonding; зварювання-паяння з тиском тощо [21–24, 53, 69, 76, 77, 80].

У судновому машинобудуванні (Південний турбінний завод "Зоря" нині ДП НВКГ "Зоря–Машпроект") цей спосіб було застосовано при ДЗВ вихідних крайок охолоджуваних соплових лопаток із жароміцних сплавів ЭИ602 і ЭП99 [4, 69]. Використовували самофлюсівні адгезійно-активні припої. Витіснений розплав створює галтель і зменшує концентрацію напружень у куті сходження кромки. Застосування прокладок, що розплавляються, дозволяє зменшити тиск і пластичні деформації металу, сприяє видаленню оксидних плівок і гарантує надійність з'єднань.

Надалі було розроблено нові адгезійно-активні системи на основі нікелю з цирконієм і гафнієм. Для дифузійного зварювання як прошарки, які розплавляються, застосовують не лише готові припої, а і тонку фольгу

## 2. 1. Дифузійне зварювання у вакуумі

металу, який забезпечує контактнo-реактивне плавлення основного металу в стику. Наприклад, на рис. 2.14 показано мікроструктуру з'єднання жароміцного нікелевого сплаву ЭП539ЛМУ через фольгу цирконію, який з нікелем при концентрації 8,8 % (ат.) цирконію утворює евтектику з температурою плавлення 1170 °С.

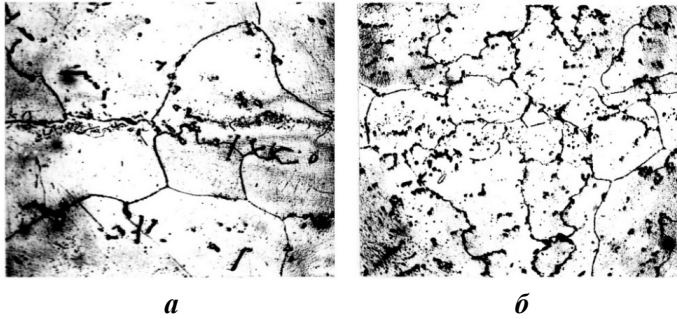


Рис. 2.14. Мікроструктура дифузійнозварного з'єднання сплаву ЭП539ЛМУ (проміжний прошарок – фольга цирконію, тиск – 15 МПа, температура – 1185 °С при часі зварювання 3 хв (а,  $\times 300$ ) і 6 хв (б,  $\times 200$ ))

Зварні з'єднання, мікроструктуру яких показано на рис. 2.14, після стандартної термічної обробки забезпечують міцність і довготривалу пластичність на рівні основного металу.

Дослідження процесу витіснення залишків розплаву зі стику показали, що серед двокомпонентних розплавів кращі результати дають системи Ni–13 % Zr і Ni–12 % Si. Вплив тиску на товщину прошарків двокомпонентних систем показано на рис. 2.15. Температури визначалися за найкращою характеристикою змочування кожної системи.

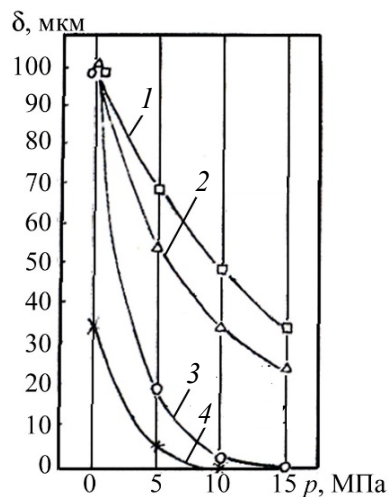


Рис. 2.15. Залежність товщини прошарку в стику сплавів Ni–4V (1), Ni–40Mn (2), Ni–12Si (3), Ni–13Zr (4) % (мас.) від тиску при з'єднанні сплаву ЭП99

2.1.2. Технологія дифузійного зварювання у вакуумі за традиційною схемою

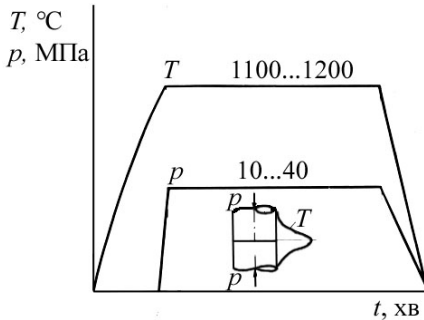


Рис. 2.16. Циклограма ДЗВ за традиційною схемою

За визначенням Міжнародного інституту зварювання утворення монолітного з'єднання відбувається у результаті зближення контактних поверхонь за рахунок локальної пластичної деформації при підвищеній температурі. У ньому немає опису характеру дії тиску, температури, інших умов зварювання, але більшість з'єднань металів отримано при постійних температурі і тиску. Таку схему називають традиційною. Типову

циклограму ДЗВ за традиційною схемою показано на рис. 2.16.

Технологію зварювання за цією циклограмою в роботі [19] названо ДЗВ за схемою вільного деформування. Вона легко реалізується і тому широко використовується.

На рис. 2.16 показано інтервали температур і тисків для різних сталей. Важливим фактором є також середовище (зазвичай вакуум), але для вибору параметрів режиму велике значення має також підготовка поверхонь, які з'єднуються [15]. Чим вищий вакуум у зварювальній камері, тим менша взаємодія металу з газами. Ступінь вакуумування повинен бути економічно доцільним і технологічно достатнім.

Зварювання більшості металів ведуть у вакуумі порядку  $10^{-2}$  Па, що досягається за допомогою механічних насосів об'ємної дії та найбільш поширених дифузійних паромасляних насосів. Зварювання у вакуумі має економічні переваги перед зварюванням у середовищі інертних газів та забезпечує суттєво більш досконалий захист порівняно з високочистими інертними газами, що і визначає широке застосування вакууму в зварюванні.

Поверхні матеріалів зачищають механічною обробкою ( $R_a = 0,72 \dots 1,38$  мкм) з наступним знежиренням. Механічна обробка в порівнянні з електролітичною доцільніша, тому що внесені при механічній обробці структурні дефекти прискорюють процес утворення монолітного з'єднання.

Вибір інших параметрів режиму розглянемо, наприклад, для жароміцних сплавів ЭИ602 (ХН75МБТЮ), ЭИ826 (ХН70ВМФТЮ), ЭП99 (ХН50ВМКТЮР) і ВЖ98 (ЭИ868 або ХН60ВТ) [5]. Температуру зварювання жароміцних сплавів призначають, виходячи з впливу температури на їх пластичність та інші властивості, процеси рекристалізації, дифузії, можливої втрату пластичності.

## 2. 1. Дифузійне зварювання у вакуумі

На рис. 2.17 показано вплив температури на пластичність  $\epsilon$  жароміцних сплавів Ni–Cr–Al–Co і ЭИ617 (ХН70ВМТЮ), з якого видно, що при температурах вище 1200...1250 °С пластичність сплавів різко падає. Критерієм оцінки пластичності при стискуванні є величина пластичної деформації  $\epsilon$  до появи тріщин у металі. Оскільки наведені діаграми є характерними для жароміцних нікелевих сплавів, то температуру їх зварювання доцільно вибирати в інтервалі 1100...1200 °С.

Зварне з'єднання повинне мати однакову рівновісну структуру, тому при вибраній температурі зварювання необхідно уникати критичних деформацій, при яких величина зерна різко збільшується. Для цього можна користуватися діаграмами рекристалізації сплавів (див. рис. 2.12).

Вплив режимів зварювання на механічні властивості з'єднань деяких жароміцних сплавів показано на рис.2.18–2.20. Графіки рис. 2.18 побудовані для сплавів ЭП99 та ЭИ602 при часі зварювання 6 хв [22], для сплаву ВЖ98 – 30 хв при температурі 1200 °С [76].

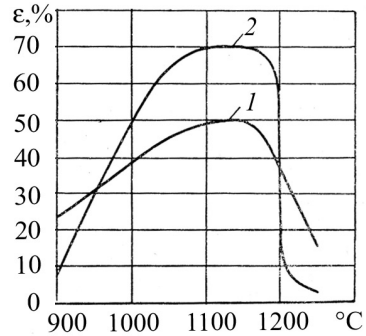


Рис. 2.17. Діаграми технологічної пластичності жароміцних нікелевих сплавів:  
1 – сплав Ni–Cr–Al–Co;  
2 – сплав ЭИ617

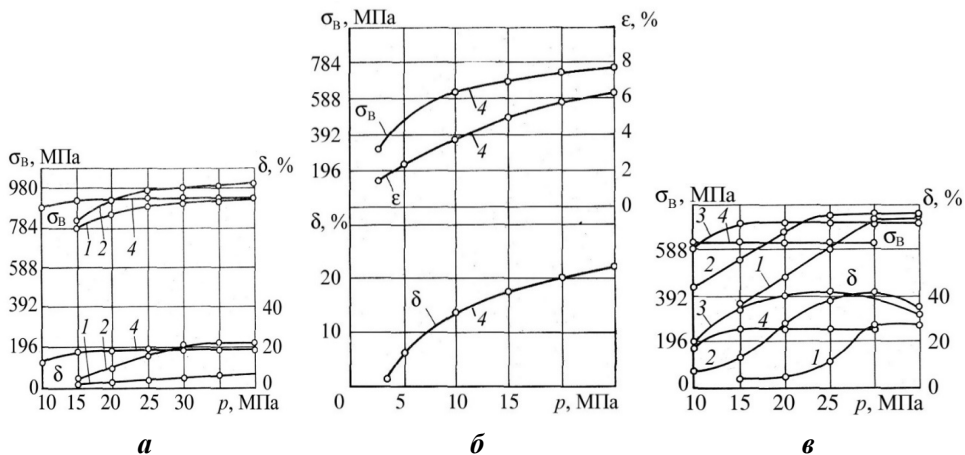


Рис. 2.18. Вплив тиску зварювання на границю міцності з'єднань при нормальній температурі сплавів ЭП99 (а), ЭИ602 (б), ВЖ98 (в) і при температурах зварювання:  
1 – 1100; 2 – 1150; 3 – 1175; 4 – 1200 °С

## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

У всіх випадках зварювання сплавів зразки стискували за допомогою гідропресу, але для сплаву ВЖ98 тиск підтримували однаковим протягом всього циклу зварювання, а для сплавів ЭИ602 і ЭП99 – лише протягом 4...6 с і при його зниженні за рахунок повзучості не відновлювали. Цим пояснюється суттєва різниця в тисках при зварюванні вказаних сплавів.

Наведені рис. 2.18 рівняння повзучості (2.1) і дифузії (2.5), (2.6), (2.8), (2.9) показують, що температура, тиск і час зварювання взаємопов'язані. Підвищення температури призводить до росту швидкості повзучості, прискорення дифузійних процесів та рекристалізації, що скорочує час, необхідний для утворення якісного зварного з'єднання. Аналогічно впливає тиск. Вивчення фрактографій (поверхні руйнування з'єднань) при зварюванні сплаву ЭП99 показало, що при температурі 1100 °С і тиску 10 МПа за 6 хв забезпечується фактичний контакт лише на 20...30 % всієї площі поверхні. Механічні властивості таких з'єднань дуже низькі. Тиск 15 МПа забезпечує фактичний контакт поверхонь на 60 % площі, при 20 МПа – 90 %, а при 25 МПа – 100 % всієї площі.

Якщо з'єднання зі сплаву ЭП99 при температурі зварювання 1100 °С мають механічні властивості значно нижчі, ніж основний метал, то з'єднання зі сплаву ЭИ602 мають властивості, близькі до властивостей основного металу. Це пояснюється меншою жароміцністю сплаву ЭИ602 і вищою дифузійною рухливістю атомів сплаву. На відміну від сплаву ЭП99, у з'єднаннях сплаву ЭИ602 зерна на окремих ділянках переростають стик. Підвищення температури зварювання до 1150...1175 °С забезпечує зростання міцності і пластичності також з'єднань сплавів ЭП99 і ВЖ98. У зоні стику утворюються спільні зерна. Характер впливу тиску на властивості з'єднань з підвищенням температури не змінюється, хоча фізичний контакт з'єднаних поверхонь досягається при менших тисках, але при тій же величині загальної пластичної деформації зразків (близько 3 % для сплавів ЭП99 і ЭИ602). Для кожної температури існує певний мінімальний тиск, що забезпечує 100%-й фізичний контакт поверхонь за даний час. Експериментальні результати добре узгоджуються з розрахунками.

Вплив температури зварювання на властивості з'єднань сплавів показано на рис. 2.19. Для сплаву ВЖ98 показано також величину пластичної деформації  $\delta$  зразків при зварюванні. Час зварювання сплавів ЭП99 та ЭИ602 складав 6 хв, сплаву ВЖ98 – 30 хв.

З підвищенням температури зварювання до 1150 °С міцність і особливо пластичність з'єднань зростають. У зоні стику проходить рекристалізація. При температурах вище 1175 °С інтенсивність розчинення зміцнювальної  $\gamma'$ -фази зростає. Розчиненню  $\gamma'$ -фази сприяє також

## 2. 1. Дифузійне зварювання у вакуумі

збільшення часу зварювання. Підвищення температури вище 1200 °С для більшості сплавів викликає інтенсивний ріст зерна. При температурі 1250 °С навіть низькі тиски зварювання багатьох сплавів призводять до утворення тріщин, що підтверджує необхідність врахування діаграм технологічної пластичності при виборі режимів зварювання.

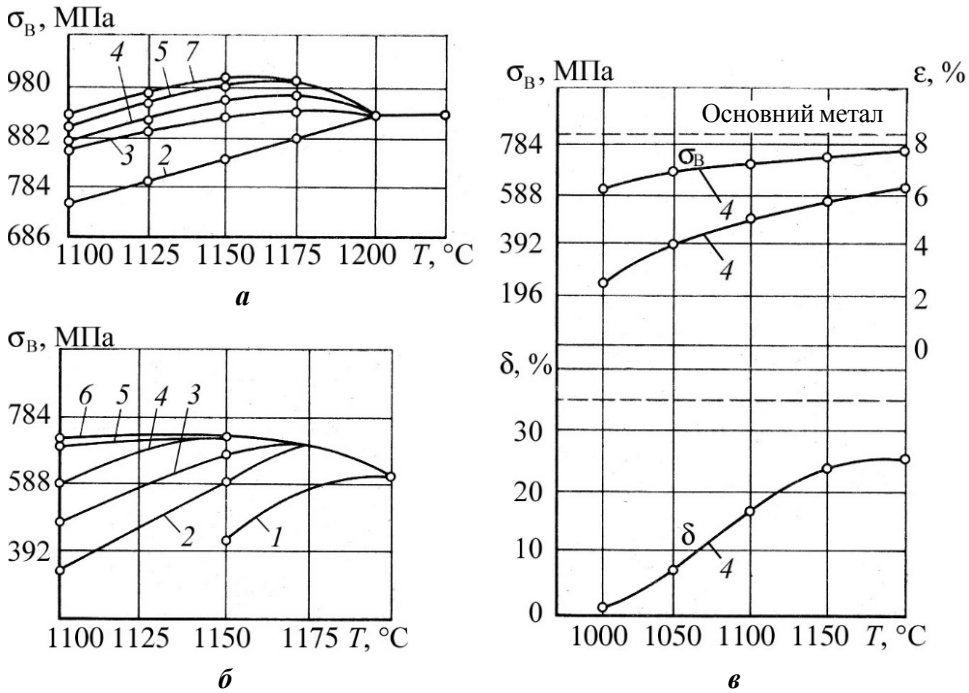


Рис. 2.19. Вплив температури на властивості з'єднань при нормальній температурі сплавів ЭП99 (а), ЭИ602 (б), ВЖ98 (в) при тисках: 1 – 10; 2 – 15; 3 – 20; 4 – 25; 5 – 30; 6 – 35; 7 – 40 МПа

При дифузійному зварюванні, залежно від параметрів режиму, відбуваються пластична деформація металу і деякі характерні для неї явища: поява двійникових зерен, субзерен, рекристалізація, полігонізація, міграція границь зерен тощо. Двійникові зерна обумовлені одночасним ковзанням по системі атомних площин і поворотом деформованої частини кристалу, а субзерна, які мають будову, близьку до досконалої, і різну орієнтацію – величиною деформації і температурою. Чим вища температура зварювання, тим менші деформації (тиски) призводять до утворення субструктури. При зварюванні сплаву ЭП99 субструктури спостерігали при температурі 1175 °С, часі зварювання 6 хв і тиску 30 МПа, а при температурі 1200 °С – при тиску 20 МПа.



## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

При зварюванні в зоні стику внаслідок деформації мікровиступів проходить подрібнення зерен, яке мало помітне при збільшенні у 200 разів, але чітко виявляється при збільшенні у 1000 разів.

При дифузійному зварюванні сплавів ЭИ602 і ЭП99 спостерігається ефект термомеханічної обробки. Цим можна пояснити високі механічні властивості з'єднань при часі зварювання до 6 с за умови забезпечення фізичного контакту поверхонь (рис. 2.20).

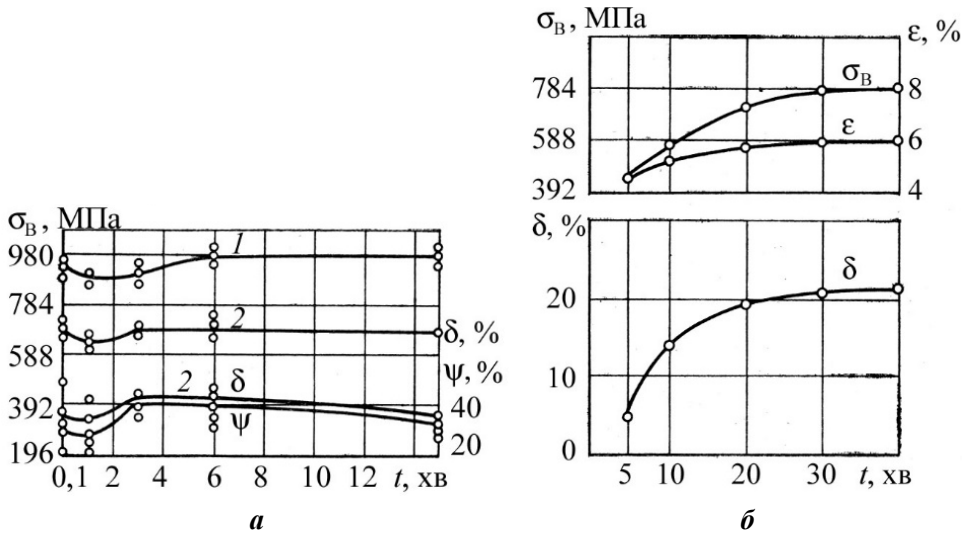


Рис. 2.20. Вплив часу зварювання на властивості з'єднань при нормальній температурі сплавів ЭП99 (1) і ЭИ602 (2) (а) та сплаву ВЖ98 (б)

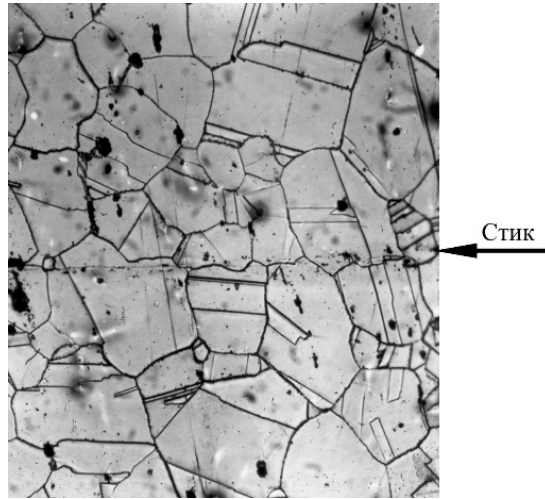
Ефект термомеханічної обробки жароміцних сплавів зазвичай виявляється при пластичній деформації 10...50 % в області температур 1100...1200 °С із наступним швидким охолодженням як у воді, так і на повітрі. Деформація металу в зоні стику може перевищувати 10 %, а дійсна деформація мікровиступів значно вища і, за даними роботи [45], досягає 40...60 %.

Описаний характер впливу часу зварювання на властивості зварних з'єднань спостерігався лише при тисках, які забезпечували утворення фізичного контакту з'єднуваних поверхонь за рахунок деформації повзучості. Про наявність такого контакту свідчить те, що подальша витримка зразків протягом 5 хв при температурі зварювання без тиску забезпечила механічні властивості з'єднань на рівні основного металу за механічними властивостями. При тиску 20 МПа фізичний контакт поверхонь забезпечувався протягом 3...4 хв. Здебільшого рівноцінність зварних з'єднань та основного металу досягали при деформації сплавів у зоні стику не менше 5 %.

## 2. 1. Дифузійне зварювання у вакуумі

Дослідження мікроструктури і механічних властивостей з'єднань показали, що момент утворення фізичного контакту не збігається з моментом досягнення рівномірності з'єднань та основного металу. Досягненню рівномірності сприяють об'ємні процеси дифузії і рекристалізації, які забезпечують зарощування мікрodefектів, розчинення оксидних плівок, утворення спільних зерен. Ці процеси краще проходять при ДЗВ однофазних (без  $\gamma'$ -фази) сплавів, наприклад у з'єднаннях сплаву ЭИ602 (рис. 2.21).

Рис. 2.21. Мікроструктура з'єднання сплаву ЭИ602;  $\times 200$



За циклограмою на рис. 2.16 виконується також ДЗВ з проміжними прокладками, які розплавляються або не розплавляються. Прокладки, які знаходяться в твердому стані, почали застосовувати уже з початку розробки ДЗВ твердосплавного різального інструменту. Між твердим сплавом і стальним корпусом різців установлювали "м'яку" нікелеву прокладку.

У пружній стадії роботи основних матеріалів і прошарку критерієм "м'якості" є модуль пружності. Прошарки, які мають менший модуль пружності, ніж з'єднані матеріали, називають "м'якими", а з більшим модулем – "твердими" або "жорсткими". У пластичній стадії роботи вузлів критерієм оцінки прошарку є границі плинності основних матеріалів і прошарку: прошарок називають "м'яким", якщо його границя плинності  $\sigma_{т пр}$  менша, ніж основних матеріалів  $\sigma_{т о.м}$  ( $\sigma_{т пр} < \sigma_{т о.м}$ ), "твердим" навпаки. Як "м'які" прошарки зазвичай застосовують нікель, мідь, алюміній.

Розглянемо роботу на розтяг "м'якого" і "твердого" прошарків товщиною  $h$  у стрижні круглого перерізу з діаметром  $d$ , як показано на рис. 2.22.

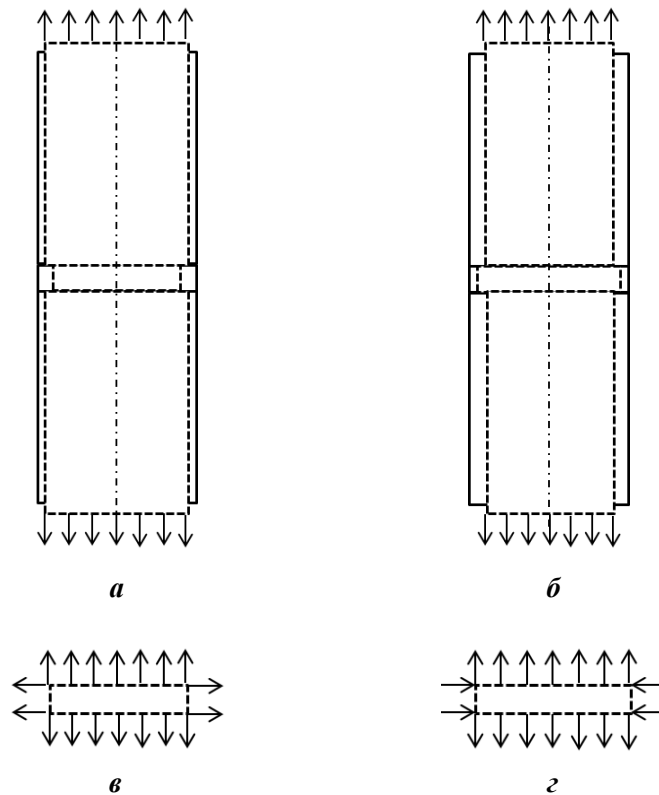


Рис. 2.22. Схеми деформацій стрижнів з "м'яким" прошарком (а) і "твердим" прошарком (б) та напружений стан "м'якого" (в) і "твердого" (г) прошарків при одновісному розтягу (початкове положення – суцільні лінії)

При навантаженні стрижня з "м'яким" прошарком матеріал останнього має більше подовження вздовж осі і відповідно більше укорочення в радіальному напрямку порівняно зі стрижнем, як показано на рис. 2.22,а. При цьому за рахунок нерозривності деформацій по границі поділу матеріалів у прошарку з'являються напруження розтягу як в осьовому, так і в радіальному напрямках (див. рис. 2.22,в). Напружений стан стає об'ємним з розтягом у всіх напрямках, для якого характерним є зменшення еквівалентних напружень, що утруднює появу пластичних деформацій, тобто проявляється ефект зміцнення матеріалу "м'якого" прошарку зі зниженням еквівалентних напружень (розвантаження).

У випадку одновісного стиску прошарок знаходиться також в об'ємному напруженому стані, але зі стиском у всіх напрямках, що також зменшує еквівалентні напруження (при рівномірному всебічному стиску (розтягу) еквівалентні напруження дорівнюють нулю).

При навантаженні стрижня з "твердим" прошарком (див. рис. 2.20,б) осьовий розтяг матеріалу останнього поєднується зі стиском у радіальному напрямку (див. рис. 2.22,г), що збільшує еквівалентні напруження. Тому метал прошарку при рівній його міцності з основним матеріалом повинен пластично деформуватися раніше, а якщо прошарок крихкий, то в ньому утворюються тріщини.

Розглянуті ефекти зміцнення (розвантаження) в пластичному стані прошарку підсилюються за рахунок більшого коефіцієнта поперечної деформації ( $\mu = 0,5$ ) порівняно з пружним станом ( $\mu = 0,25 \dots 0,30$ ). Коли метал "м'якого" прошарку починає деформуватися пластично, то основний метал знаходиться в пружному стані і їхні коефіцієнти поперечної деформації (коефіцієнти Пуассона) відрізняються майже в два рази, що збільшує ефект зміцнення прошарку. Відомі факти, коли при міцності матеріалу прошарку, нижчій, ніж в основного металу, і його малій відносній товщині руйнування відбувається по основному металу [29].

Несуча здатність з'єднань з м'якими прошарками визначається не лише властивостями самого прошарку, а і його відносною товщиною. Відносна товщина – це відношення товщини  $h$  прошарку до діаметра  $d$  циліндра або меншого розміру прямокутного перерізу зразка. У роботах О.О. Бакші показано, що при певних низьких значеннях відносної товщини прошарку руйнування з'єднання може відбуватися не по м'якому прошарку, а по більш міцному основному металу. Це явище, що отримало назву *контактного зміцнення*, проявляється при розтягуванні, стискуванні, вигині та інших видах навантаження [29].

Для з'єднань з м'яким прошарком у зоні стику з основним матеріалом спостерігається концентрація напружень. При роботі таких з'єднань важливу роль відіграє характер напружено-деформованого стану. Міцність і пластичність з'єднань з концентраторами напружень залежать від жорсткості напруженого стану. Жорсткість  $\eta$  напруженого стану визначається відношенням максимального головного напруження  $\sigma_{\max}$  до еквівалентного напруження  $\sigma_{\text{екв}}$  [30]

$$\eta = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{екв}}} \quad (2.10)$$

Рівняння (2.10) дозволяє визначити характер напруженого стану. Якщо  $\eta = 1$ , то це відповідає лінійному напруженому стану. Для плоского та об'ємного напружених станів  $\eta > 1$ . Чим більша жорсткість напруженого стану, тим менша пластичність металу. Реальну оцінку жорсткості напруженого стану дозволяє визначити комп'ютерне моделювання, яке дозволяє врахувати вплив різних факторів на формування НДС.

## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

У роботі [29] описано виконані її авторами експерименти зі зварювання високолегованого нікелевого сплаву з границею міцності 950...1010 МПа через прошарок нікелю НП2 з границею міцності 280...300 МПа, товщиною 0,05...0,50 мм, а також через прошарок нікелевого покриття товщиною 0,015 мм, нанесеного гальванічним способом. Стикові з'єднання випробували на розтяг циліндричних зразків діаметром робочої частини 5 мм. Усі зразки з відносною товщиною прокладки 0,06 і менше руйнувалися по нікелевому сплаву. При цьому в з'єднаннях з відносною товщиною прошарку 0,06 руйнуванню передувала деяка пластична деформація прошарку, яка полягала в зменшенні площі перерізу зразків у зоні прошарку, а потім зразок деформувався і руйнувався поза зоною з'єднання. При відносній товщині прошарку 0,04 і менше деформації прошарку не спостерігалися, а при відносній товщині 0,09 з'єднання руйнувалися по прошарку.

Запропоновано різні формули для оцінки контактного зміцнення, які ґрунтуються на аналітичних рішеннях рівнянь рівноваги елементів з'єднання, що не дозволяє визначити працездатність усього з'єднання і вузла [29]. При переході до інших вузлів конструкції з тих же матеріалів технології ДЗВ відрізняються. Рекомендовані формули не враховують зміни складу, структури і механічних властивостей прошарку за рахунок дифузії з обмеженого джерела елементів, хоча розглядаються прошарки товщиною в тисячні частки міліметра. При з'єднанні металів з керамікою, графітом тощо руйнування відбувається не по прошарку, а на ділянці неметалу з максимальними напруженнями розтягу – найнижчим показником кераміки чи графіту. Тому оцінка працездатності вузлів повинна базуватися на результатах комп'ютерного моделювання НДС з урахуванням деформацій миттєвої пластичності і повзучості, які суттєво змінюють НДС, тим більше в з'єднаннях з м'яким, пористим або перфорованим прошарком. При сучасному рівні комп'ютерної техніки і програмного забезпечення таке моделювання дозволяє отримати реальні результати для конкретних виробів.

Проміжні прокладки використовують при з'єднанні матеріалів, які мають металургійну несумісність, або для активації поверхонь, що з'єднуються. У роботі [42] рекомендовано застосування ультрадисперсних порошків, як ефективного способу інтенсифікації процесів формування з'єднань з використанням форміатів металів. ДЗВ виконується через відновлений ультрадисперсний порошок нікелю або пористу стрічку, яку отримано прокатуванням ультрадисперсного порошку форміатного нікелю.

Розглядаючи основні функціональні завдання прокладок, слід урахувати також їх вплив на працездатність з'єднань і вузлів.

## 2. 1. Дифузійне зварювання у вакуумі

Розроблений у 1953 р. і запатентований у провідних країнах світу спосіб ДЗВ одразу знайшов широке застосування в різних галузях промисловості для з'єднання як однорідних, так і різнорідних матеріалів. При цьому інтенсивно досліджувалися теоретичні основи ДЗВ, як і інших способів зварювання у твердому стані, що дозволило виділити одностаїно визнані в узагальненому процесі зварювання в твердому стані три основні стадії, хоча і не при всіх способах усі ці стадії мають місце (див. п. 1.1.2).

Паралельно відбувалося удосконалення ДЗВ. Іноді удосконалені способи стали відомими під іншими назвами, які підкреслювали, наприклад, обмеження часу або температури зварювання, способи стиснення, активації поверхонь тощо. Важливо те, що уже в 1978 р. 700 підприємств застосовували ДЗВ для створення унікальних виробів, у тому числі з використанням більше 560 різнойменних пар матеріалів.

Основні параметри режимів ДЗВ деяких матеріалів наведено в табл. 2.2. Для зварювання багатьох матеріалів визначальне значення мають підготовка поверхонь до зварювання, швидкість нагрівання й охолодження, наступна термічна обробка тощо. Особливо важливий термічний цикл при зварюванні металів із неметалами, металів і сплавів з особливими властивостями, що досягаються шляхом термічної обробки.

Таблиця 2.2. Параметри режимів ДЗВ деяких матеріалів

№ з/п	З'єднувані матеріали	$T$ , °C	$p$ , МПа	$t$ , хв	Вакуум, Па
1	Ст. 45 + Ст. 45	1000...1050	20...15	5	$10^{-1}$
2	Чавун СЧ10 + Ст3	850	10	10	$10^{-1}...10^{-2}$
3	12Х2Н4А + 12Х2Н4А	1150...1180	10	12	$10^{-3}$
4	20Х13 + 20Х13	900...950	15	10	$10^{-2}$
5	12Х18Н9Т + 12Х13	1050	15	20	$10^{-1}$
6	Тверді сплави + мартенситні сталі	1050...1120	15...12	12...10	$10^{-1}$
7	Сталь Э10 + Бр.Х0,8	1000	10	30	$10^{-1}$
8	Жароміцні сплави: ХН80ТБЮА + ХН65ВМТЮ	1200	20	20	$10^{-1}$
9	Мідь + мідь	850...880	8...5	20	$10^{-2}$

## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

*Продовж. табл. 2.2*

№ з/п	З'єднувані матеріали	$T, ^\circ\text{C}$	$p, \text{МПа}$	$t, \text{хв}$	Вакуум, Па
10	Мідь + нікель	900	13...15	20...30	$10^{-2}$
		400	10	20	$10^{-6}$
11	Мідь + Zn + алюміній	540...510	5...7	15...20	$10^{-1}$
12	Титановий сплав: BT5-1 + BT5-1	1000	5	5	$10^{-1}$
13	Молибден + молибден	1700	10	5	$10^{-2}$
14	Титан + графіт	950	7	20	$10^{-1}$
15	Титановий сплав пористий + компактний	850	5	20	$10^{-3}$
		950	2,65...5,00	40	$10^{-3}$

При зварюванні необхідно забезпечувати однакові значення параметрів режиму у всіх точках з'єднання. Наприклад, для нагрівання струмами високої частоти характерним є виділення теплоти в тонкому приповерхневому шарі деталі та його розповсюдження до центру. Для вирівнювання температури по всьому перерізу шляхом теплопровідності слід мати певний час та контролювати температуру поверхні. Необхідний час нагрівання, питома потужність та потужність, що передається деталі, можуть бути розраховані з використанням рішення рівняння теплопровідності.

Наведені в табл. 2.2 параметри режимів ДЗВ вибрані з опублікованих робіт багатьох авторів. Здебільшого зварювання виконувалося у вакуумі  $10^{-1}$  Па і лише зварювання міді з нікелем при температурі  $400^\circ\text{C}$  виконували у вакуумі  $10^{-6}$  Па. Нікель і особливо мідь мають високі пружності дисоціації і пружності парів оксидів, при яких вакуум  $10^{-6}$  Па забезпечує утворення міжатомних зв'язків з'єднаних металів при тиску 10 МПа протягом часу дії 20 хв. Температури і тиски зварювання мають логічний зв'язок з температурами плавлення і деформаційною здатністю металів. Слід також відзначити, що вимоги до зварних з'єднань можуть бути різними.

### ***2.1.3. Технологія дифузійного зварювання у вакуумі з керованим напружено-деформованим станом***

На даний час з використанням дифузійного зварювання отримано з'єднання понад 800 видів пар різнойменних матеріалів [29, 42], але

і сьогодні є актуальною розробка нових способів активації поверхонь інтенсифікації процесів отримання з'єднань шляхом спеціальної обробки поверхонь, використання деформацій зсуву тощо. Це пов'язано з нестабільністю формування з'єднань при зміні форми і розмірів зварних вузлів і навіть по площі стику. Зазвичай розподіл напружень по всій площі стику вважають рівномірним, а нестабільність формування з'єднань пояснюють масштабним фактором. Насправді такий розподіл має місце лише при з'єднанні однорідних матеріалів з однаковими ФМВ та при відсутності концентраторів напружень, а при зварюванні матеріалів з різними ФМВ, геометрією, типами з'єднань, видами дії зовнішнього навантаження тощо розподіл та величина напружень і деформацій істотно змінюються.

Детальні дослідження формування з'єднань по площі стику при ДЗВ жароміцних нікелевих сплавів ЭИ607А і ЭИ869 було виконано в Центральному науково-дослідному і проектно-конструкторському котлотурбінному інституті імені І.І. Ползунова [77]. За характером поверхні руйнування зразків встановлено, що найбільш слабкі з'єднання циліндричних заготовок знаходяться в центральній зоні стику, які суттєво поступаються зразкам, вирізаним за цією зоною. Це обумовлено тим, що характер розподілу пластичних деформацій у зоні стику такий же, як і при осаджуванні циліндричних заготовок між паралельними плитами [81]. У центрі стику деформації зсуву та активація поверхонь відсутні [47, 49]. Це було підтверджено також для інших типів з'єднань у роботах [19, 21, 48, 50] та інших. Для забезпечення стабільності формування з'єднань при ДЗВ запропоновано багато різних заходів, наприклад застосування пластичних прошарків, циклічна зміна зусилля стиску, прикладання до деталей зусиль розтягу, створення в зоні стику напружень розтягу в одній деталі і стиску – в другій, які були спрямовані на проведення в зоні стику більш інтенсивних пластичних деформацій. У роботі [19] такі способи ДЗВ були виділені в окрему групу *способів зварювання з вимушеним деформуванням*, але для вибору найбільш ефективної схеми ДЗВ необхідно знати закономірності формування напружено-деформованого стану в з'єднаннях залежно від фізико-механічних властивостей матеріалів і структурних перетворень, їх змін, геометричних характеристик вузлів, технологічних параметрів, пластичних деформацій миттєвої пластичності і повзучості, що дозволяють отримати лише комп'ютерні методи моделювання НДС при ДЗВ. Для моделювання НДС використовують метод скінченних елементів (МСЕ), який розглянуто в роботах [47–49, 50, 57, 63] та в підручнику [57].

Результати моделювання дозволяють вибрати найбільш ефективну схему реалізації ДЗВ і говорити *про ДЗВ з керованим НДС*. При ДЗВ



## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

матеріалів з різними ФМВ ефективним способом керування НДС є термоциклування при зовнішній силовій дії, що дозволяє поєднувати дію термічних і структурних напружень та напружень від зовнішнього тиску [60]. Ефективність ДЗВ з керованим НДС розглянемо на прикладі з'єднання заготовок корпусу електромагнітного клапана гідросистеми літаків (рис. 2.23).

Деталі 1, 3, 5 корпусу виготовляють зі сталі 12Х18Н10Т, деталі 2, 4 – зі сталі 10895. Дифузійне зварювання у вакуумі з нагріванням струмами високої частоти всіх заготовок дозволяє з'єднувати одночасно всі деталі (чотири стики). З'єднані деталі мають різні площі перерізу і ФМВ. Тому при однакових температурі і зусиллі стиску деталі мають різні пластичні деформації, а для забезпечення надійної роботи клапана необхідно створити рівномірний замкнутий контур між вставками з немагнітної сталі 12Х18Н10Т, що вимагає жорсткого контролю НДС при зварюванні і концентрації пластичних деформацій у зоні стику.

Моделювання НДС проводили методом скінченних елементів з використанням ліцензованого програмного комплексу ANSYS.

Усі зварні стики корпусу являють собою вузли втулка-фланець (В-Ф).

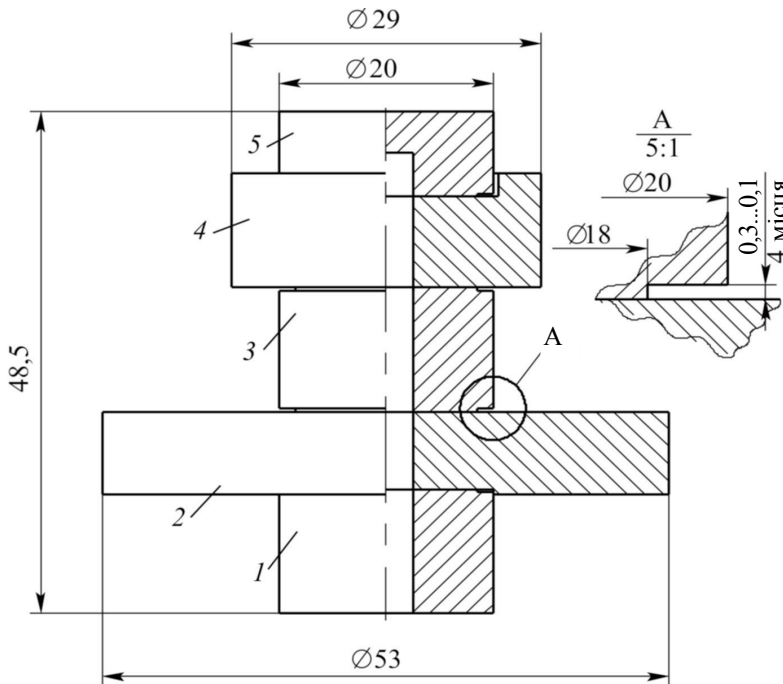


Рис. 2.23. Заготовки корпусу електромагнітного клапана, складені для ДЗВ

## 2. 1. Дифузійне зварювання у вакуумі

Загальний вигляд вузла показано на рис. 2.24,*а*, а його модель – на рис. 2.24,*б*. На моделі цифрами позначено перерізи, для яких будували епюри напружень і деформацій миттєвої пластичності і повзучості та їх поля.

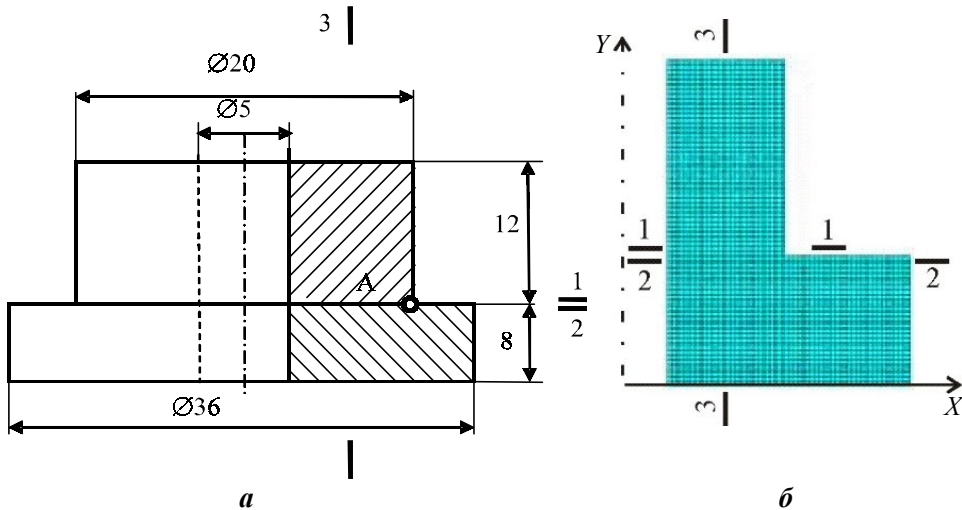


Рис. 2.24. Загальний вигляд (*а*) та осьовий переріз скінченно– елементної моделі (*б*) вузла В-Ф

Для моделювання напружень і пластичних деформацій у зварних вузлах потрібно знати модулі пружності, ТКЛР, границі плинності, швидкості повзучості та їх залежність від температури з'єднуваних матеріалів.

**Моделювання напружень вузла В-Ф у пружному стані.** Розглянемо напруження при ДЗВ при постійній температурі (традиційна схема) та при зміні температури. Для спрощення моделювання розглянемо зміну температури на 100 °С і прийнемо середні для цього інтервалу значення ФМВ матеріалів. Варіанти досліджуваних моделей записані в табл. 2.3.

Таблиця 2.3. Варіанти досліджуваних моделей

Номер моделі	Модуль пружності $E \cdot 10^{-5}$ , МПа		ТКЛР $\alpha \cdot 10^5$ , град $^{-1}$		$P$ , МПа	$\Delta T$ , °С
	$E_1$ (втулка)	$E_2$ (фланець)	$\alpha_1$ (втулка)	$\alpha_2$ (фланець)		
1	1,0	1,0	1,0	1,0	40	0
2	1,0	2,0	1,0	1,0	40	0
3	2,0	1,0	1,0	1,0	40	0
4	1,0	1,0	1,0	2,0	–	+100
5	1,0	1,0	2,0	1,0	–	+100
6	1,0	1,0	1,0	2,0	40	+100
7	1,0	1,0	2,0	1,0	40	+100

## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

Моделі 1, 2 і 3 відповідають зварюванню втулки і фланця за традиційною схемою (при постійному  $p = 40$  МПа) і постійній температурі. Втулка і фланець в мод. 1 виготовлені з одного матеріалу (з однаковими ФМВ) в мод. 2 і 3 втулка і фланець відрізняються модулями пружності. Моделі 4–7 мають втулки і фланці однакової жорсткості (рівні модулі пружності), а їх ТКЛР відрізняються в 2 рази. Моделі 4 і 5, на відміну від попередніх, мають лише температурне навантаження (нагрівання або охолодження) на  $100$  °С після схоплювання поверхонь, які з'єднуються. Моделі 6 і 7 мають температурне ( $+100$  °С) і силове навантаження тиском  $40$  МПа.

Поля осевих, радіальних, дотичних і еквівалентних напружень для різних моделей показано на рис. 2.25–2.28. Як видно з полів напружень, у точці переходу від втулки до фланця на зовнішній поверхні вузлів існує концентратор напружень.

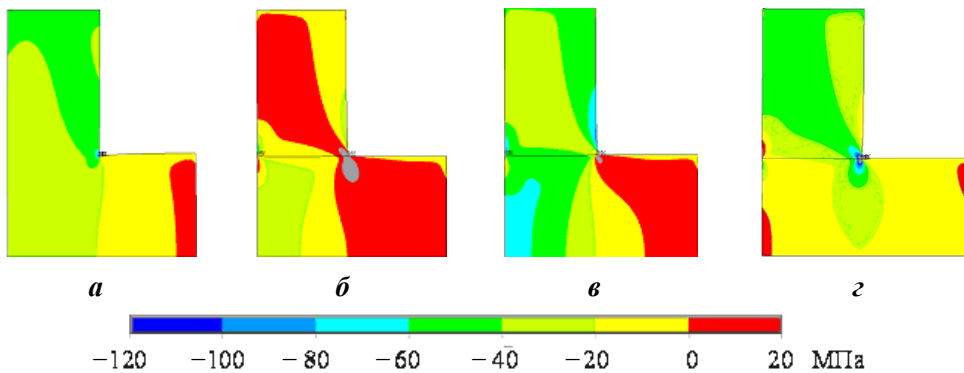


Рис. 2.25. Поля осевих напружень  $\sigma_y$  в мод. 1 (*a*), мод. 4 (*б*), мод. 6 (*в*), мод. 7 (*г*)

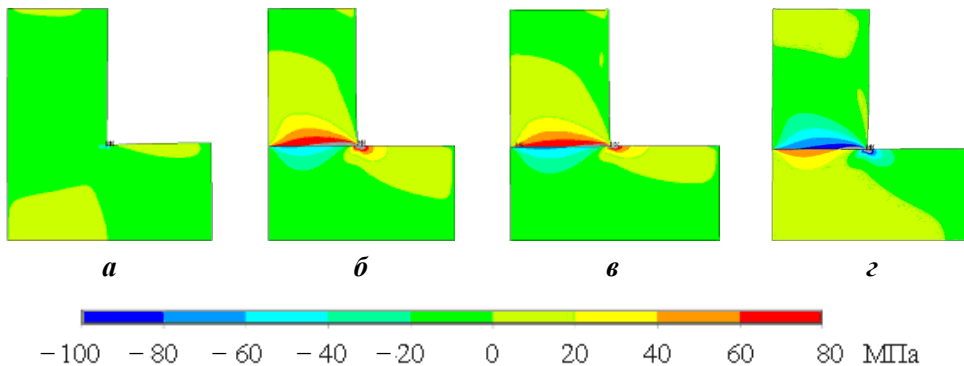


Рис. 2.26. Поля радіальних напружень  $\sigma_x$  в мод. 1 (*a*), мод. 4 (*б*), мод. 6 (*в*), мод. 7 (*г*)

## 2. 1. Дифузійне зварювання у вакуумі

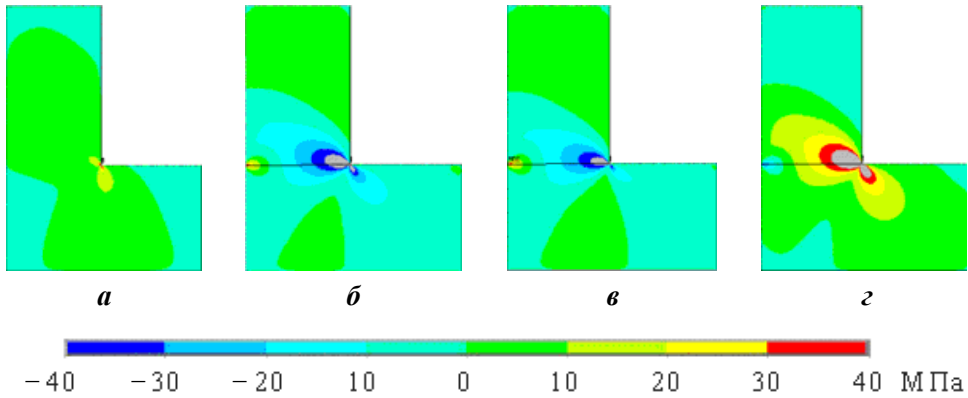


Рис. 2.27. Поля дотичних напружень  $\tau_{xy}$  в мод. 1 (*a*), мод. 4 (*б*), мод. 6 (*в*), мод. 7 (*г*)

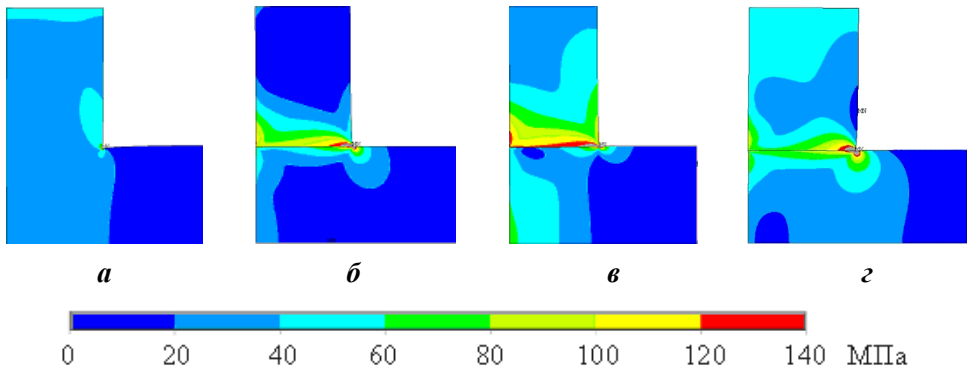


Рис. 2.28. Поля еквівалентних напружень  $\sigma_{екв}$  в мод. 1 (*a*), мод. 4 (*б*), мод. 6 (*в*), мод. 7 (*г*)

Епюри напружень у мод. 1 показано на рис. 2.29, з якого видно, що рівень напружень у зоні концентрації значно перевищує прикладені (номінальні) – 40 МПа і складає від 75 МПа (осьові і дотичні) до 150 МПа (радіальні та еквівалентні). У зоні концентрації напружень формується об'ємний напружений стан всестороннього стиснення. За зоною концентратора по стику всі напруження, крім осьових і еквівалентних, наближаються до нуля.

Осьові напруження при віддаленні від точки концентрації напружень по стику знижуються і складають біля 0,75 від номінальних на більшій частині довжини стику. Таким чином, осьові напруження  $\sigma_y$  в мод. 1 на більшій частині стику менші від середніх по перерізу втулки на 15...25 %.

## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

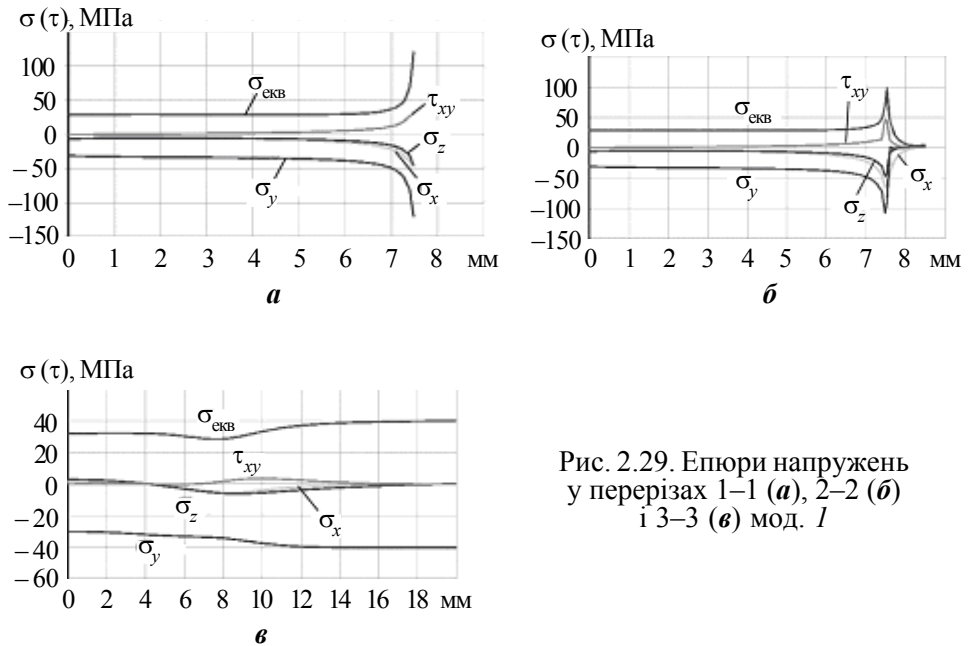


Рис. 2.29. Епюри напружень у перерізах 1-1 (а), 2-2 (б) і 3-3 (в) мод. 1

Еквівалентні напруження по більшій частині довжини стику (біля 90 %) як у втулці, так і у фланці розподілені рівномірно і знаходяться на рівні 30 МПа, що складає 75 % від номінальних і лише в точці концентрації напружень збільшуються до 150 МПа.

У поздовжньому перерізі 3-3 (див. рис. 2.29, в) осеві та еквівалентні напруження у фланці нижчі від номінальних (біля 30 МПа) і підвищуються до номінальних (40 МПа) у втулці на відстані 4,5...5,0 мм від стику. Решта напружень близькі до нуля і дещо підвищуються біля стику.

За характером розподілу осевих і еквівалентних напружень слід очікувати, що рівень пластичних деформацій у зоні стику буде нижчим, ніж у самій деталі при віддаленні від стику, і варіант ДЗВ за традиційною схемою не є оптимальним.

У моделях 2 і 3 жорсткість матеріалу фланця або втулки збільшено в два рази, але це практично не змінило характер полів і епюр напружень. Основні закономірності, встановлені для ДЗВ втулки і фланця однакової жорсткості, не змінюються і при різних жорсткостях деталей.

Результати моделювання напруженого стану (НС) показують, що навіть при ДЗВ однорідних металів, і наявності концентратора напруження розподіляються нерівномірно по перерізу деталі. Очевидно, такий розподіл будуть мати і пластичні деформації, які визначають процеси утворення фізичного контакту, деформаційної активації поверхонь та впливають на об'ємну взаємодію матеріалів.

## 2. 1. Дифузійне зварювання у вакуумі

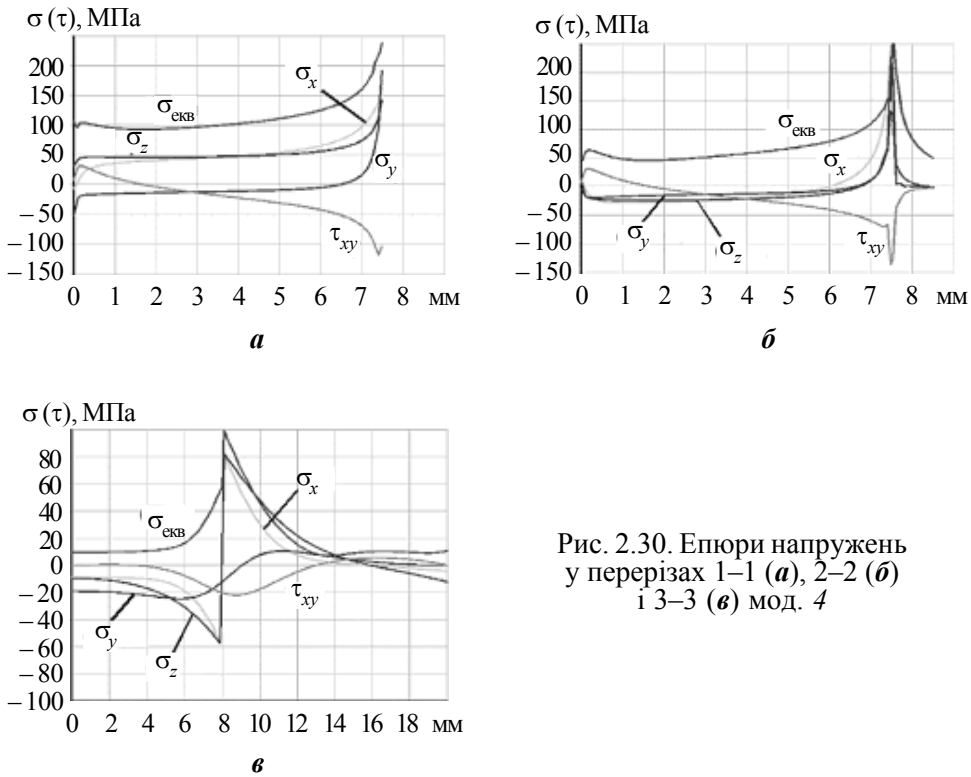


Рис. 2.30. Епюри напружень у перерізах 1-1 (а), 2-2 (б) і 3-3 (в) мод. 4

Модель 4 за полями напружень суттєво відрізняється від мод. 1. Епюри напружень мод. 4 показано на рис. 2.30.

У мод. 4 при нагріванні (охолодженні) на  $100^\circ\text{C}$  за рахунок різниці ТКЛР матеріалів втулки і фланця виникають істотні напруження, які локалізовані в зоні стику. При цьому формується об'ємний напружений стан з появою осевих  $\sigma_y$ , радіальних  $\sigma_x$ , колових  $\sigma_z$ , дотичних  $\tau_{xy}$  і еквівалентних  $\sigma_{\text{екв}}$  напружень. Розподіл напружень нерівномірний, але всі вони досягають максимального рівня біля стику (див. рис. 2.30, в).

У точці переходу від втулки до фланця на зовнішній поверхні присутня концентрація напружень з різким підвищенням усіх складових напруженого стану як у втулці (переріз 1-1), так і у фланці (переріз 2-2).

Модель 5 відрізняється від мод. 4 оберненим співвідношенням ТКЛР матеріалів втулки і фланця. Поля та епюри напружень при цьому аналогічні, але змінюються знаки. Встановлені закономірності формування напружень залишаються дійсними.

Таким чином, у вузлах В-Ф при термічному навантаженні нагріванням або охолодженням створюється складний НС, локалізований саме в зоні стику.

## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

У моделях 6 і 7, на відміну від попередніх, одночасно з термічним навантаженням діє зусилля стиску. Епюри напружень в перерізах 1–1 (а), 2–2 (б) і 3–3 (в) мод. 6 показано на рис. 2.31.

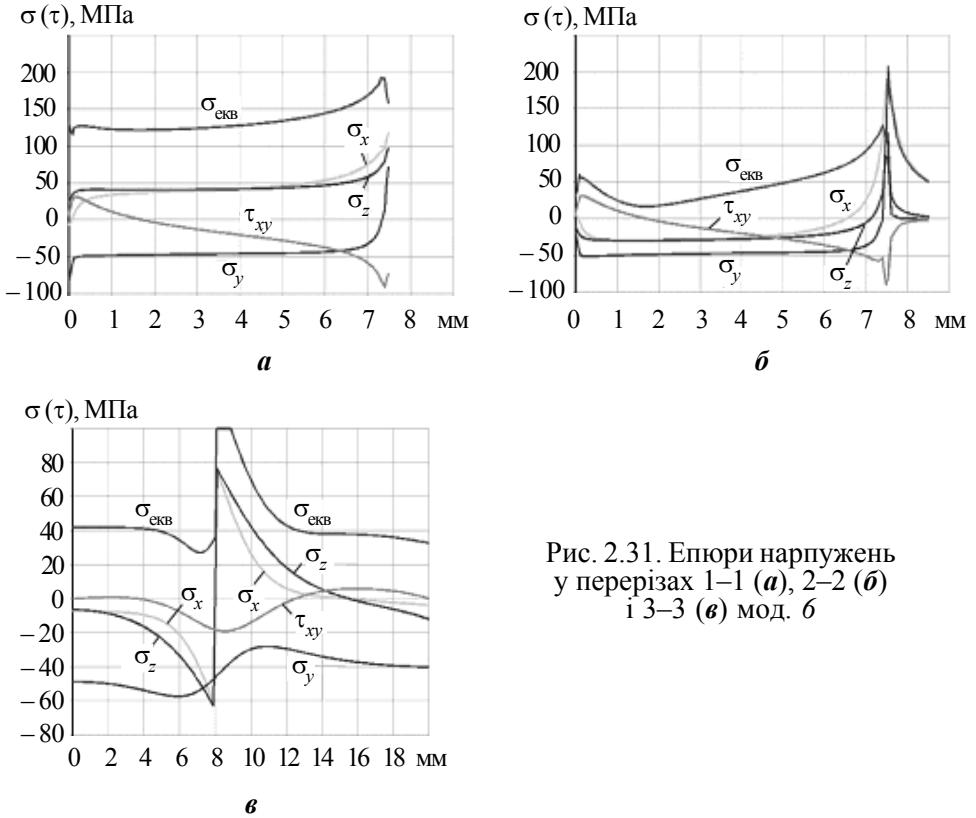


Рис. 2.31. Епюри напружень у перерізах 1–1 (а), 2–2 (б) і 3–3 (в) мод. 6

Як видно з полів і епюр напружень мод. 6 (див. рис. 2.25–2.28, 2.31), по довжині стику напруження  $\sigma_x$  і  $\sigma_z$  розподілені рівномірно, істотно змінюючись лише в зоні концентрації.

У середній зоні стику радіальні  $\sigma_x$  і колові  $\sigma_z$  напруження досягають 45 МПа у втулці і 30 МПа у фланці. У втулці, матеріал якої має менший ТКЛР, при нагріванні діють напруження розтягу, у фланці з більшим ТКЛР – напруження стиску, при охолодженні – навпаки. Осьові напруження  $\sigma_y$  є стискуючими в обох деталях і досягають – 50 МПа, тобто на 25 % перевищують зовнішній тиск 40 МПа (див. рис. 2.31, а, б). Дотичні напруження вздовж стику розподіляються нерівномірно, досягаючи в зоні концентрації напружень біля 100 МПа і з протилежного кінця – 30 МПа. Точка з нульовими дотичними напруженнями знаходиться від внутрішньої поверхні на відстані 0,23...0,25 товщини втулки.

## 2. 1. Дифузійне зварювання у вакуумі

Еквівалентні напруження у втулці на більшій частині довжини стику перевищують зовнішній тиск більше, ніж в 3 рази (див. рис. 2.31,*а*). У фланці еквівалентні напруження розподілені нерівномірно, підвищуючись при наближенні до внутрішньої і зовнішньої поверхонь (див. рис. 2.31,*б*). На відстані 0,23...0,25 товщини втулки від внутрішньої поверхні еквівалентні напруження є мінімальними (20 МПа). Положення цієї точки збігається з точкою нульових дотичних напружень. У поздовжньому перерізі 3–3 радіальні  $\sigma_x$ , і колові  $\sigma_z$  напруження різко зменшуються, осьові  $\sigma_y$  дещо знижуються у втулці і зростають у фланці, дотичні  $\tau_{xy}$  зменшуються до нуля при віддаленні від стику (див. рис. 2.31,*в*). Еквівалентні напруження різко зростають лише у втулці, залишаючись низькими у фланці, матеріал якого має більший ТКЛР (див. рис. 2.31,*г*).

Аналіз епюр напружень свідчить про те, що НС в зоні стику з боку втулки характеризується дією напружень розтягу по двох осях і стиснення по третій, що сприяє розвитку пластичних деформацій. З боку фланця НС близький до всебічного стиснення поблизу точки нульових дотичних напружень. При віддаленні від цієї точки НС переходить спочатку в плоске стиснення, а потім в об'ємне стиснення по двох осях і розтягування по третій (в зоні концентрації напружень).

Моделювання НС показало, що поєднання зовнішнього тиску з термічним навантаженням (нагрівання на 100 °С) сприяє локалізації пластичних деформацій у матеріалі втулки біля стику, де рівень еквівалентних напружень істотно перевищує зовнішній тиск. У матеріалі фланця є зона біля точки нульових дотичних напружень, в якій еквівалентні напруження мають мінімальне значення (20 МПа) і деформації можуть бути мінімальними.

Модель 7 поєднує термічне навантаження нагрівом на 100 °С і зовнішній тиск 40 МПа, але на відміну від мод. 6 втулка має більший ТКЛР, ніж фланець. Поля напружень для цієї моделі показано на рис. 2.25–2.28, а епюри напружень – на рис. 2.32.

Поля та епюри мод. 7 відрізняються більшою рівномірністю розподілу напружень по більшій частині довжини стику порівняно з мод. 6. Еквівалентні напруження у точці нульових дотичних напружень зростають до 70 МПа порівняно з 20 МПа в мод. 6. Ці напруження у втулці і фланці на більшій частині довжини стику знаходяться на рівні 80 МПа, тобто перевищують зовнішній тиск у 2 рази. Епюри в поздовжньому перерізі 3–3 показують, що еквівалентні напруження істотно зростають у зоні стику як у втулці, так і у фланці.



## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

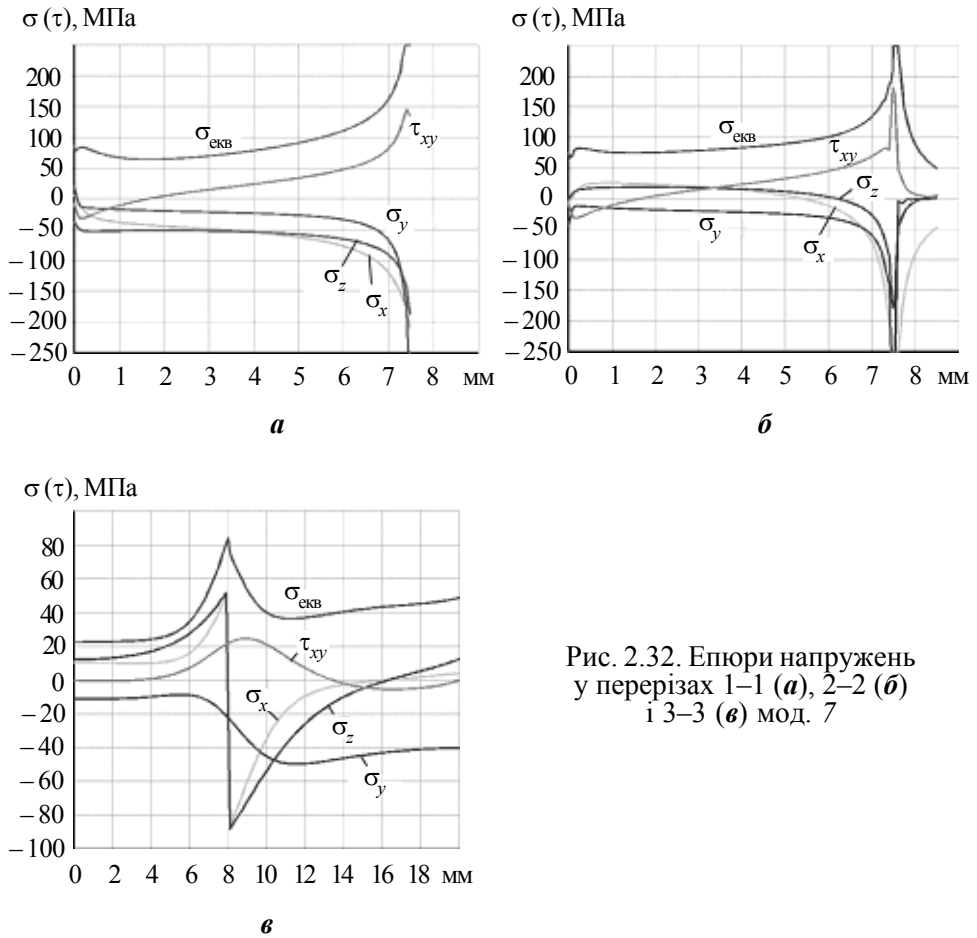


Рис. 2.32. Епюри напружень у перерізах 1-1 (а), 2-2 (б) і 3-3 (в) мод. 7

Характер розподілу напружень вздовж стику відрізняється мало від мод. 6, але в мод. 7 більш помітне зростання всіх напружень біля зовнішньої поверхні втулки. Колові і радіальні напруження, змінивши знак в мод. 7, зростають до  $-90$  МПа у втулці і до  $-50$  МПа у фланці. Характер розподілу дотичних напружень однаковий. Вони зростають по стику біля внутрішньої і зовнішньої поверхонь до 30 і 150 МПа відповідно. Точка нульових дотичних напружень залишається на тій же відстані, що і в мод. 6.

Поєднання зовнішнього тиску і термічного навантаження нагріванням на  $100$  °С в мод. 7 створює сприятливі умови для локалізації пластичних деформацій у зоні стику як у матеріалі втулки, так і в матеріалі фланця, рівень еквівалентних напружень істотно перевищує зовнішній тиск, що виключає пластичну деформацію деталей за зоною стику.

Зіставлення результатів моделювання НС розглянутих моделей показує, що при постійних температурі і стисненні як однорідних, так і різнорідних матеріалів у пружному стані в зоні стику існують головним чином осьові напруження (моделі 1–3). Напружений стан близький до лінійного. При з'єднанні деталей різної жорсткості (різні модулі пружності) з'являються незначні радіальні  $\sigma_x$ , колові  $\sigma_z$  і дотичні  $\tau_{xy}$  напруження.

Рівень осьових і еквівалентних напружень на більшій частині стику в моделях 1–3 у втулці і фланці залишається однаковим. У поздовжньому перерізі 3–3 в матеріалі більшої жорсткості напруження незначно зростають. У матеріалі з меншою жорсткістю в зоні стику еквівалентні напруження зменшуються. У моделях 1–3 НС близький до одновісного стиснення. При цьому існує можливість значної деформації деталей поза стиком.

При зварюванні металів однакової жорсткості з різними ТКЛР (моделі 4, 5) при нагріванні (охолодженні) у зоні стику формується складний НС, у результаті чого розподіл напружень різко змінюється: з'являються радіальні, колові і дотичні напруження. Середні еквівалентні  $\sigma_{\text{екв}}$ , дотичні  $\tau_{xy}$  досягають 110...130 МПа, середні радіальні  $\sigma_x$  і колові  $\sigma_z$  напруження у втулці – до 50 МПа, у фланці – до 30 МПа. Різко зростають дотичні напруження, які в стикі біля внутрішньої і зовнішньої поверхонь мають різні знаки. Точка нульових дотичних напружень знаходиться на відстані 0,23...0,25 товщини втулки від внутрішньої поверхні.

При поєднанні термічного навантаження із зовнішнім тиском (моделі 6, 7) рівень еквівалентних напружень визначається зовнішнім тиском, різницею ТКЛР з'єднаних матеріалів, температурним інтервалом теплосмін, об'ємними змінами при структурних перетвореннях. Еквівалентні напруження можуть істотно перевищувати зовнішній тиск та досягати границі плинності.

Позитивний вплив теплосмін обумовлений появою радіальних, колових і дотичних напружень та їх локалізацією у зоні стику. Внаслідок цього слід очікувати аналогічної локалізації і пластичних деформацій. Це підтверджують результати моделювання НДС з урахуванням пластичних деформацій.

Для моделювання НДС необхідно знати залежність границі плинності металів, що з'єднуються, від температури та рівняння повзучості.

Деформацію миттєвої пластичності, яка не залежить від часу, визначали за умови, коли еквівалентні напруження досягають границі плинності. Еквівалентні напруження знаходили за Мізесом:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{екв}} &= \left( \frac{1}{2} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) \right] \right)^{\frac{1}{2}} = \\ &= \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_y - \sigma_y \sigma_z - \sigma_z \sigma_x + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)},\end{aligned}\quad (2.11)$$

або для вісесиметричної задачі за рівнянням

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{екв}} &= \left( \frac{1}{2} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\tau_{xy}^2 \right] \right)^{\frac{1}{2}} = \\ &= \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_y - \sigma_y \sigma_z - \sigma_z \sigma_x + 3\tau_{xy}^2},\end{aligned}\quad (2.12)$$

оскільки решта напружень дорівнює нулю.

Для врахування деформації повзучості залежно від умов деформації користуються рівнянням (2.1) (Нортон для другої стадії) або рівнянням (2.2) (Time Hardening для першої і другої стадій).

**Напружено-деформований стан вузла В-Ф з урахуванням деформацій миттєвої пластичності.** Для спрощення моделювання розглянемо зміну температури на 100 °С і візьмемо середні значення ФМВ. Варіанти досліджуваних моделей наведено в табл. 2.4.

У номері варіанта верхній індекс означає нагрівання "н" або охолодження "о", нижній – з урахуванням миттєвої пластичності "п". Другий нижній індекс додається, якщо зварюються матеріали різної міцності, тобто менш міцний (з меншою границею плинності) матеріал втулки має індекс "в", а матеріал фланця – "ф". Одним номером об'єднані рівноцінні варіанти.

Під номером мод. 1 об'єднанні три випадки дифузійного зварювання за традиційною схемою, коли втулка і фланець мають рівні границі плинності ( $1_{\text{п}}$ ), меншу границю плинності має втулка ( $1_{\text{пв}}$ ) і фланець ( $1_{\text{пф}}$ ).

Як показало порівняння полів напружень з відповідними полями в пружному стані, характер НС при появі пластичних деформацій (ПД) змінюється мало. Концентрація напружень у точці А (див. рис. 2.23) зберігається, але величина напружень зменшується. Пластичні деформації у випадку однакової міцності (вар.  $1_{\text{п}}$ ) і меншої міцності матеріалу втулки (вар.  $1_{\text{пв}}$ ) зосереджені у втулці удалині від стику і поблизу точки концентрації напружень (рис. 2.33, а, б). У випадку, коли меншу міцність має матеріал фланця, ПД розвиваються в ньому у вузькій зоні біля точки концентрації напружень (див. рис. 2.33, в).

2. 1. Дифузійне зварювання у вакуумі

Таблиця 2.4. Варіанти досліджуваних моделей та ФМВ з'єднаних матеріалів

Номер моделі і варіанта	ТКЛР·10 <sup>6</sup> , 1 град <sup>-1</sup>		Навантаження		σ <sub>р</sub> , МПа	
	втулка	фланець	р, МПа	Т, °С	σ <sub>р</sub> , МПа	
					втулка	фланець
1 <sub>п</sub>	10	10	40	0	39	39
1 <sub>пв</sub>	10	10	40	0	39	80
1 <sub>пф</sub>	10	10	40	0	80	39
2 <sup>н</sup> <sub>п</sub>	10	20	0	+100	60	60
	20	10	0	-100		
2 <sup>о</sup> <sub>п</sub>	10	20	0	-100	60	60
	20	10	0	+100		
3 <sup>н</sup> <sub>пв</sub>	10	20	0	+100	60	120
	20	10	0	-100		
3 <sup>о</sup> <sub>пв</sub>	10	20	0	-100	60	120
	20	10	0	+100		
3 <sup>н</sup> <sub>пф</sub>	10	20	0	+100	120	60
	20	10	0	-100		
3 <sup>о</sup> <sub>пф</sub>	10	20	0	-100	120	60
	20	10	0	+100		
4 <sup>н</sup> <sub>п</sub>	10	20	40	+100	80	80
	20	10	40	-100		
4 <sup>о</sup> <sub>п</sub>	10	20	40	-100	80	80
	20	10	40	+100		
5 <sup>н</sup> <sub>пв</sub>	10	20	40	+100	80	160
	20	10	40	-100		
5 <sup>о</sup> <sub>пв</sub>	10	20	40	-100	80	160
	20	10	40	+100		
5 <sup>н</sup> <sub>пф</sub>	10	20	40	+100	160	80
	20	10	40	-100		
5 <sup>о</sup> <sub>пф</sub>	10	20	40	-100	160	80
	20	10	40	+100		

## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

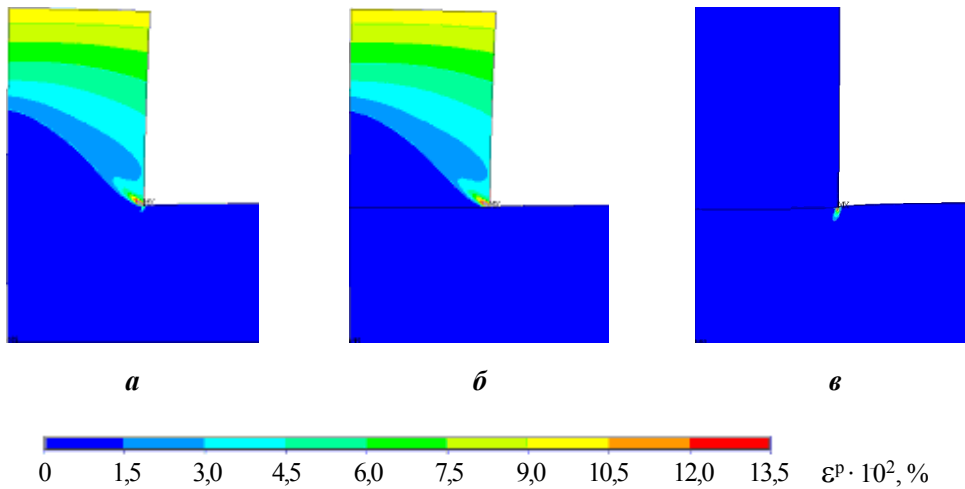


Рис.2.33. Поля пластичних деформацій мод. 1 вузла В-Ф:  
варіанти  $1_{п}$  (а),  $1_{пв}$  (б) і  $1_{пф}$  (в)

Епюри ПД підтвердили відсутність деформацій на більшій частині стику як з боку втулки, так і фланця при всіх варіантах. Максимальної величини пластичні деформації досягають у точці концентрації напружень (0,15 %). На верхній (протилежній стику) частині втулки ПД дорівнюють 0,1 %, але вона відсутні у варіанті з меншою міцністю матеріалу фланця. Такий розподіл пластичних деформацій є несприятливим для ДЗВ.

У мод. 2 зварювали втулку і фланець з різними ТКЛР і однакової міцності при термічному навантаженні після схоплювання поверхонь шляхом нагрівання ( $2_{п}^H$ ) та охолодження ( $2_{п}^O$ ) без зовнішнього тиску.

Аналіз результатів моделювання показав, що при нагріванні та охолодженні поля еквівалентних напружень і пластичних деформацій повністю збігаються, а поля осьових напружень відрізняються лише знаками.

Пластичні деформації при нагріванні та охолодженні зосереджені у вузькій зоні біля стику (рис. 2.34,а) і переважно у втулці (див. рис. 2.34,б). При віддаленні від стику ПД різко зменшуються і на відстані 1 мм дорівнюють нулю.

Розподіл напружень вздовж стику при появі пластичних деформацій стає більш рівномірним, зменшуються піки всіх напружень у точці концентрації. Поле максимальних напружень при охолодженні повторює поле мінімальних при нагріванні і навпаки. Відповідно і характер НС змінюється на протилежний зі збереженням абсолютних величин.

## 2. 1. Дифузійне зварювання у вакуумі

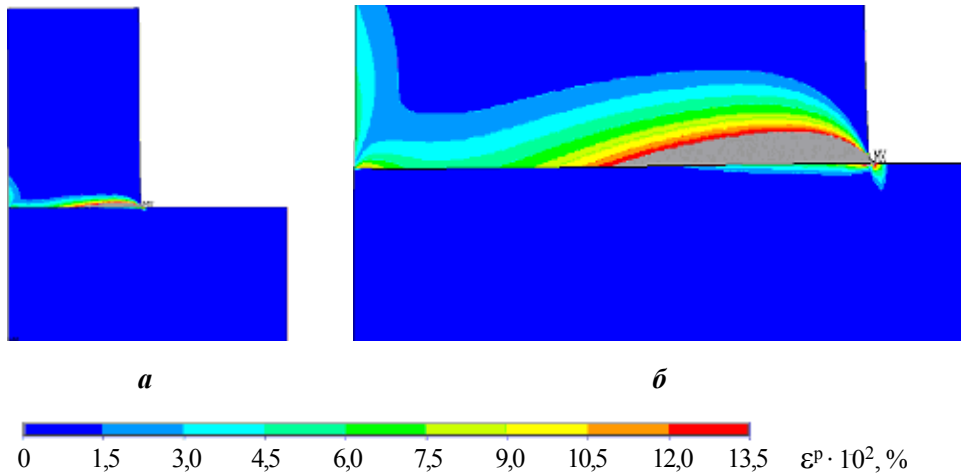


Рис. 2.34. Поле ПД при нагріванні та охолодженні в мод. 2 вузла В-Ф в зоні стику: варіанти  $2_{\text{пн}}$  (а) і  $2_{\text{по}}$  (б)

У точці на відстані від внутрішньої поверхні 0,23...0,25 товщини втулки дотичні напруження дорівнюють нулю, головні напруження з боку втулки є мінімальними  $\sigma_3$ , а з боку фланця – максимальними  $\sigma_1$  (мінімальні за модулем). У втулці в точці нульових дотичних напружень формується об'ємний напружений стан (розтягування в двох і стиснення в третьому напрямку при нагріванні), у фланці – об'ємне всебічне стиснення ( $\sigma_1 = -15$  МПа,  $\sigma_2 = \sigma_3 = -30$  МПа). При охолодженні знаки змінюються на протилежні. У точці концентрації напружень у фланці і втулці – всебічне розтягування при нагріванні і стиснення – при охолодженні. Такий характер напруженого стану не сприяє розвитку пластичних деформацій.

Зміна температури локалізує пластичні деформації в зоні стику, але їх розподіл по довжині стику нерівномірний: мінімальний рівень ПД у невеликій зоні на відстані 0,23...0,25 товщини втулки від її внутрішньої поверхні, максимальний – біля зовнішньої поверхні втулки.

У мод. 3 розглядалися варіанти ДЗВ зі зміною температури без стиснення, але з меншою міцністю матеріалу втулки ( $3_{\text{пф}}^{\text{H}}$  і  $3_{\text{пф}}^{\text{O}}$ ) при нагріванні і охолодженні. Поля та епюри напружень і пластичних деформацій порівнювали відповідно з мод. 2. Установлено, що характер НДС практично не змінюється. Пластичні деформації зосереджені у вузькій зоні біля стику. Вони мають максимальний рівень біля точки концентрації ( $\approx 1,0\%$ ), а у внутрішній частині стику поступово зменшуються, досяга-

## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

ючи мінімального значення (0,05 %) на відстані 0,23...0,25 товщини втулки від її внутрішньої поверхні, потім знову зростають і біля внутрішньої поверхні досягають 0,1 %.

Поля пластичних деформацій у зоні стику показано на рис. 2.35.

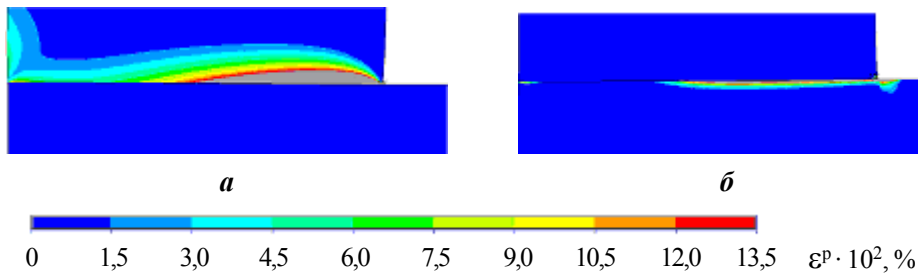


Рис. 2.35. Поля ПД у вузлі В-Ф біля стику мод. 3:

варіанти  $3_{пв}^H, 3_{пв}^O$  (а) і  $3_{пф}^H, 3_{пф}^O$  (б)

Пластичні деформації зосереджені в матеріалі з меншою міцністю, але ширина зони деформації з боку фланця істотно менша порівняно із втулкою.

Мод. 4 має втулку і фланець однакової міцності, але різні ТКЛР і навантажуються одночасно зовнішнім тиском нагріванням або охолодженням.

Порівняння результатів рішення пластичної задачі з відповідними пружними рішеннями показало, що при однаковому характері розподілу рівень максимальних напружень значно нижчий. Поля ПД при нагріванні і охолодженні у вузлі В-Ф показано на рис. 2.36.

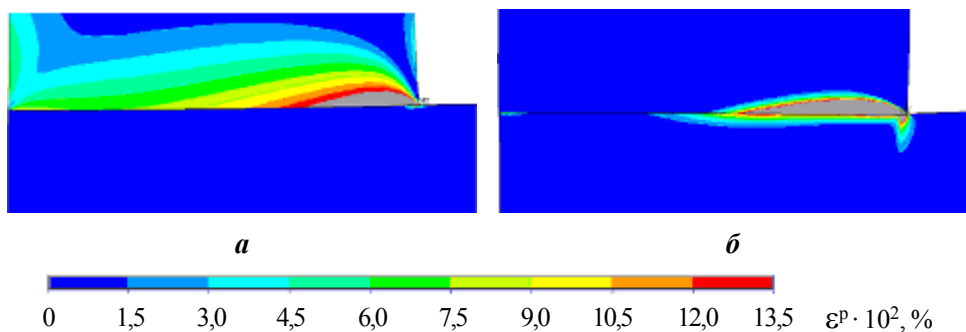


Рис. 2.36. Поля ПД при нагріванні та охолодженні мод. 4 вузла В-Ф:

варіанти  $4_{п}^H$  (а) і  $4_{п}^O$  (б)

Розподілення ПД вздовж стику у втулці з меншим ТКЛР більш рівномірне, ніж при нагріванні без тиску. В основній частині стику ПД знаходяться на рівні 0,075...0,15 %. У точці концентрації напружень вони дося-

## 2. 1. Дифузійне зварювання у вакуумі

гають 0,5 %. У фланці пластичні деформації при нагріванні практично відсутні, крім точки концентрації. При охолодженні картина протилежна. Пластичні деформації знижуються у втулці і на більшій частині стику знаходяться на рівні 0,05...0,10 %, досягаючи 0,35 % у точці концентрації.

Поєднання зовнішнього тиску 40 МПа і термічного навантаження нагріванням, коли ТКЛР втулки менший, та охолодженням, коли ТКЛР фланця менший, створює сприятливі умови для локалізації ПД саме в зоні стику. При цьому ПД розподіляється по всій довжині стику у втулці (матеріал з меншим ТКЛР) при нагріванні і у фланці при охолодженні. При оберненому значенні ТКЛР матеріалів втулки і фланця вплив нагрівання та охолодження є протилежним.

Мод. 5 відрізняється від мод. 4 лише тим, що матеріали втулки і фланця мають різні значення границі плинності.

Пластичні деформації в мод. 5, як і при рівній міцності в мод. 4, зосереджені у зоні стику, але тільки в матеріалі з меншою границею плинності. Поля ПД мод. 5 показано на рис. 2.37. Максимальна зона ПД спостерігається при нагріванні у втулці, яка має меншу міцність. При охолодженні зона ПД суттєво зменшується (див. рис. 2.37,б). При меншій міцності матеріалу фланця та охолодженні зона його ПД навпаки більша, ніж при нагріванні.

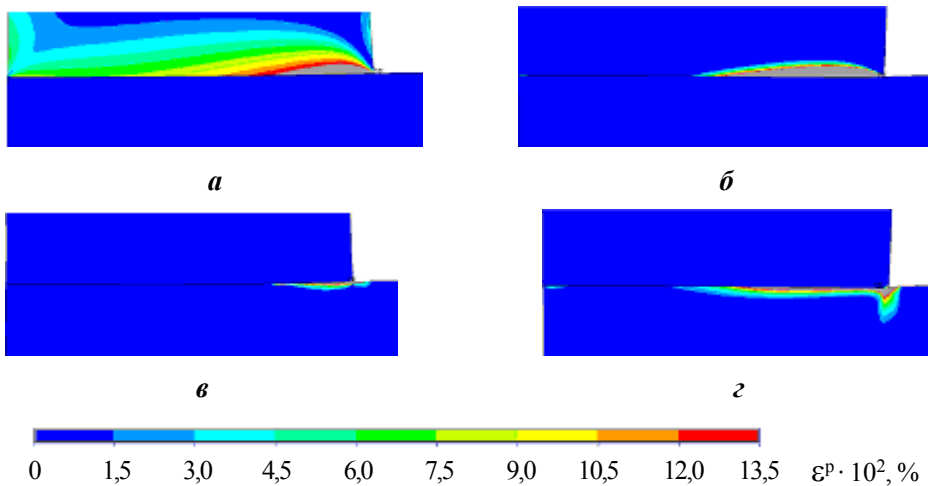


Рис. 2.37. Поля ПД мод. 5 вузла В-Ф:

варіанти  $5_{пв}^H$  (а),  $5_{пв}^O$  (б),  $5_{пф}^H$  (в) і  $5_{пф}^O$  (г)

При нагріванні деформація відбувається на невеликій частині біля концентратора напружень, а при охолодженні ПД охоплюють більшу частину стику. У зоні концентрації напружень ПД досягає 0,6...1,0 % і є максимальною. У більшій частині стику ПД знаходиться на рівні 0,075...0,15 %.



## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

Моделювання НДС з урахуванням пластичних деформацій проводили також для вузлів втулка-втулка (В-В) і циліндр-циліндр (Ц-Ц). Результати моделювання НДС для вузлів В-Ф підтвердили основні закономірності, встановлені для вузлів В-В і Ц-Ц. Особливістю НДС вузлів В-Ф є наявність концентратора напружень, біля якого рівень ПД зростає, але за рахунок ПД розподіл напружень стає більш рівномірним.

Дотичні напруження у вузлі Ц-Ц дорівнюють нулю в центрі циліндра, а у вузлах В-В і В-Ф на відстані 0,23...0,25 товщини втулки. У зоні нульових дотичних напружень еквівалентні напруження є мінімальними і, відповідно, мінімальні еквівалентні пластичні деформації, а деформації зсуву відсутні. Тому цю зону називають зоною деформаційного застою [48–50] за аналогією з НДС при гарячій обробці металів тиском (осадження циліндра між паралельними плитами) [81]. Деформаційна активація поверхонь, що з'єднуються, практично відсутня.

**Напружено-деформований стан вузлів з урахуванням деформацій повзучості.** Дослідження НДС при наявності деформацій повзучості проводили для вузлів Ц-Ц, В-В і В-Ф. Оскільки для цих вузлів принципові закономірності формування НДС однакові, то для спрощення розглянемо вплив деформацій повзучості при традиційній схемі ДЗВ з термоцикуванням при нагріванні та охолодженні на 100 °С вузла В-В, який переходить у вузол Ц-Ц, якщо радіус внутрішньої поверхні дорівнює нулю, а від вузла В-Ф відрізняється більш рівномірним розподілом напружень. Загальний вигляд і скінченноелементну модель вузла В-В показано на рис. 2.38.

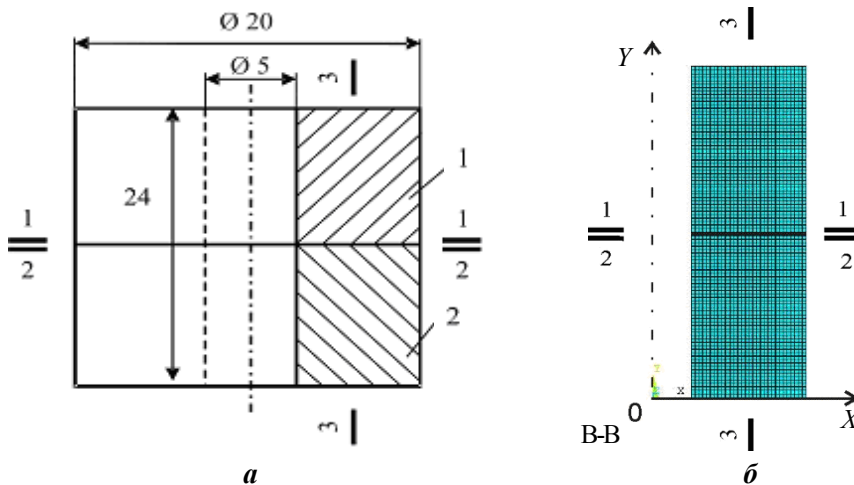


Рис. 2.38. Загальний вигляд (а) і осьовий переріз скінченноелементної моделі (б) вузла В-В:

1, 2 – деталі

## 2. 1. Дифузійне зварювання у вакуумі

Механічні властивості деталей приймали такими, щоб повзучість відбувалася лише у верхній деталі 1, наприклад при з'єднанні сталі зі сплавом молібдену або жароміцним сплавом.

При моделюванні НДС модулі пружності і коефіцієнти Пуассона для обох з'єднаних матеріалів прийняті однаковими ( $E = 1 \cdot 10^5$  МПа і  $\nu = 0,3$ ), а ТКЛР різними:  $\alpha_1 = 10 \cdot 10^{-6}$  і  $\alpha_2 = 20 \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$ . Повзучість матеріалу деталі 1 описували рівнянням (2.2) з коефіцієнтами  $C_1 = 4,99 \cdot 10^{-24}$ ;  $C_2 = 4,6$ ;  $C_3 = -0,5$ ;  $C_4 = 40700$ ;  $C_5 = 1,69 \cdot 10^{-25}$ ;  $C_6 = 4,6$ ;  $C_7 = 40700$ . Деформація повзучості в деталі 2 відсутня. При ДЗВ зовнішній тиск на деталі прийнято рівним 15 МПа. За умови повзучості верхньої деталі 1 і традиційної схеми ДЗВ (постійні температура і тиск) НДС вузлів В-В, Ц-Ц і В-Ф практично однаковий – пластичні деформації відбуваються поза зоною стику. Поля пластичних деформацій для вузла В-В для різного часу зварювання показано на рис. 2.39.

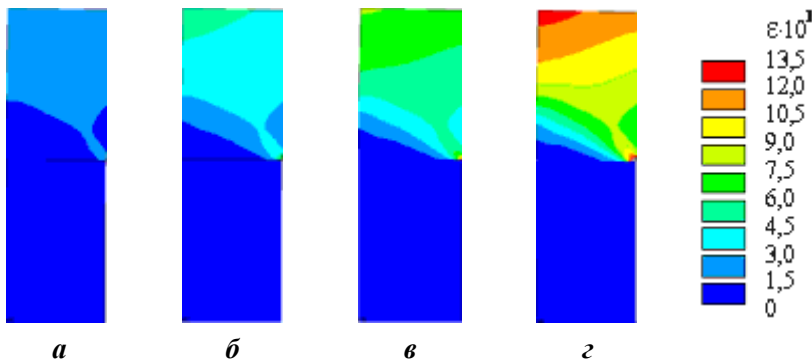


Рис. 2.39. Поля пластичних деформацій при традиційній схемі ДЗВ (після стиснення при температурі зварювання) в різні моменти часу: 60 с (а), 120 с (б), 180 с (в), 300 с (г)

Характерною особливістю полів деформацій є їх відсутність на більшій частині довжини стику. Аналогічні поля ПД формуються у вузлі В-Ф (див. рис. 2.33) для миттєвих ПД.

З рис. 2.39 видно, що зі збільшенням часу повзучості ПД збільшуються у відстані від стику (див. рис. 2.39, г).

Локалізацію пластичних деформацій у зоні стику забезпечує термічне навантаження при нагріванні (охолодженні) за рахунок різних ТКЛР з'єднаних матеріалів. Найбільш ефективним є поєднання термічного навантаження і зовнішнього тиску, який сприяє підвищенню рівня пластичних деформацій у зоні стику та більш рівномірному їх розподілу. Найкращим варіантом є термоцикування (нагрівання та охолодження

## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

у певному температурному інтервалі), коли пластичні деформації можуть розвиватися в зоні стику, то в одному, то в другому металі, що забезпечує найбільш ефективне використання деформацій повзучості при формуванні з'єднань.

Епюру деформацій повзучості вздовж стику при ДЗВ з термоцикуванням (три термоцикли) через певні проміжки часу показано на рис. 2.40.

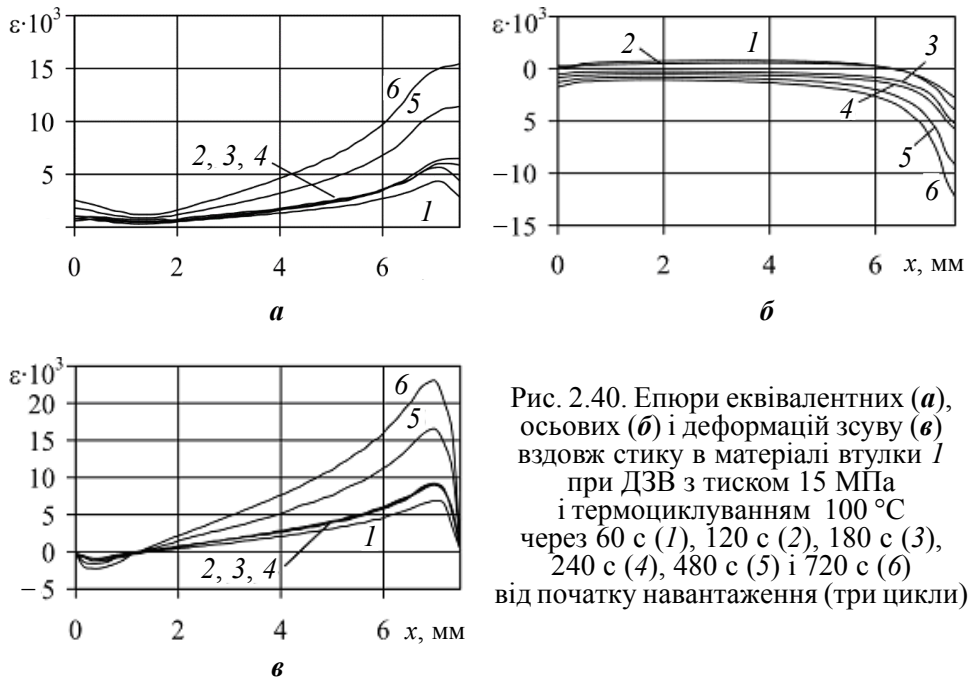


Рис. 2.40. Епюри еквівалентних (*a*), осевих (*б*) і деформацій зсуву (*в*) вздовж стику в матеріалі втулки *1* при ДЗВ з тиском 15 МПа і термоцикуванням 100 °С через 60 с (*1*), 120 с (*2*), 180 с (*3*), 240 с (*4*), 480 с (*5*) і 720 с (*6*) від початку навантаження (три цикли)

З рис. 2.40 видно, що навантаження зовнішнім тиском і термоцикуванням забезпечує наявність пластичних деформацій по всьому стику, але їх величина на різних ділянках не однакова. При повторенні циклів рівень деформацій зростає. Епюри показують наявність зони деформаційного застою. При термоцикуванні положення цих зон дещо змінюється і ПД зростають, на відміну від традиційної схеми ДЗВ. Ця зона найбільш характерна для вузла Ц-Ц, в якому вона знаходиться біля осі. У цій зоні ПД практично відсутні, що виключає деформаційний механізм активації поверхні. На рис. 2.41 показано структуру металу в зоні деформаційного застою при ДЗВ сталей 12Х18Н10Т і 10864 за традиційною схемою при температурі 1050 °С (*a*) і ДЗВ з термоцикуванням в інтервалі 1050...750 °С (*б*). При зварюванні з термоцикуванням площина з'єднання не виявляється, а при традиційній схемі в стику чітко видно границю з'єднання із залишками оксидної плівки.

## 2. 1. Дифузійне зварювання у вакуумі

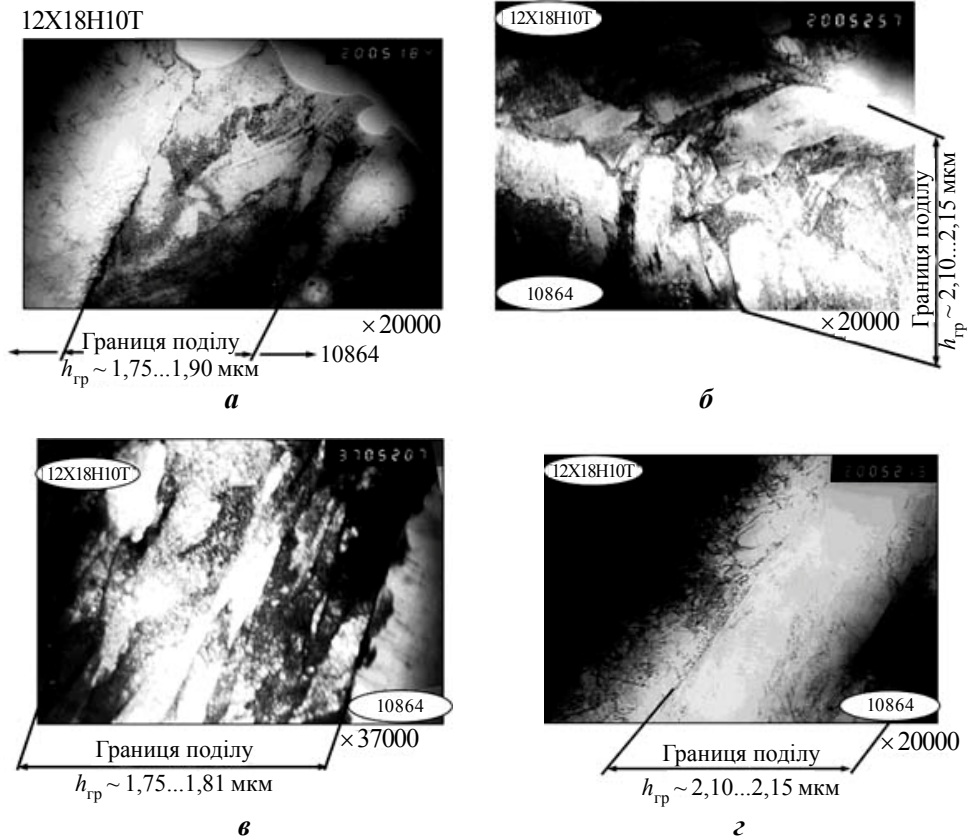


Рис. 2.41. Структура металу в зоні деформаційного застою в стикі при ДЗВ за традиційною схемою (**а**) і з термоциклуванням (**б**) та за традиційною схемою на середині радіуса (**в**) і біля поверхні циліндра (**г**)

Як видно з рис. 2.41, при традиційній схемі ДЗВ деформаційні процеси в стикі розвиваються на середині радіуса. Біля поверхні циліндра розвиваються релаксаційні процеси та рекристалізація. Найбільш сприятливі умови розвитку пластичних деформацій, їх локалізацію біля стикі та формування з'єднань забезпечує ДЗВ з термоциклуванням, що підтверджує результати моделювання НДС. При цьому розвиваються деформації миттєвої пластичності і повзучості та рекристалізації зі спільними зернами в стикі.

Урахування деформацій повзучості показало, що при одночасному силовому і термічному (охолодження-нагрівання) навантаженні у вузлі з різнорідних матеріалів складний НДС повторюється в наступних циклах. Характер зміни напружень і деформацій у циклах практично однаковий,

## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

але рівень напружень і деформацій зростає, у тому числі і в зоні деформаційного застою. Час повзучості повинен контролюватися для попередження суттєвих деформацій деталей.

Моделювання НДС з урахуванням ПД повзучості підтверджує основні закономірності його формування, встановлені для пружного стану та з урахуванням деформацій миттєвої пластичності, але кількісну характеристику і розподіл напружень та ПД можна встановити лише з урахуванням миттєвих пластичних деформацій і деформацій повзучості.

При моделюванні НДС необхідно враховувати вплив геометрії, конструктивних та інших факторів реального виробу. При моделюванні НДС вузла В-Ф стосовно корпусу електромагнітного клапана (див. рис. 2.23) було враховано всі необхідні фактори, в тому числі і можливість пластичних деформацій як миттєвої пластичності, так і повзучості в обох матеріалах (сталі 12Х18Н10Т і 10895). Для їх врахування використано криві повзучості (див. рис. 2.4), залежності модулів пружності і границі плинності обох матеріалів від температури та їх дилатограми.

Термоциклування починали з охолодження від температури 1000 °С до 700 °С і наступним нагріванням до 1000 °С (три термоцикли). Оскільки сталь 10895 в інтервалі термоциклування при температурах магнітного і структурного перетворень має різкі зміни ТКЛР, швидкості повзучості і границі плинності, то весь інтервал 700...1000 °С розбивався на менші інтервали. Результатом моделювання є поля та епюри всіх складових напружень, еквівалентних напружень, головних напружень з графічним зображенням напрямку їх дії. Для оцінки адекватності моделювання можна вивести переміщення будь-яких точок та зіставити їх з експериментальними. На рис. 2.42 показано зміну конфігурації деталі в зоні А з'єднання втулки 3, позначеної цифрою 1, з фланцем 2 (див. рис. 2.23), а зварні вироби – на рис. 2.43.

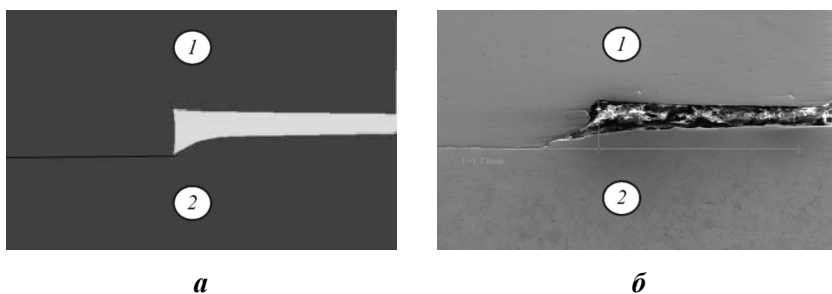


Рис. 2.42. Конфігурація корпусу електромагнітного клапана в зоні А з'єднання втулки 1 і фланця 2 після ДЗВ з термоциклуванням: за результатами моделювання (а) і в реальній деталі (б);  $\times 40$



Рис. 2.43. Зовнішній вигляд зварних виробів

Зіставлення конфігурацій корпусу в зоні *A*, отриманих моделюванням (див. рис. 2.42, *a*) і експериментально за три цикли (*b*) показує задовільну узгодженість. Локалізація пластичних деформацій підтверджується дрібнозернистою структурою металу в зоні стику, а також результатами просвічування електронним променем фольги.

На основі результатів моделювання розроблено технологію ДЗВ з керованим напружено-деформованим станом одночасно чотирьох стиків заготовок корпусу електромагнітного клапана, що дозволило відмовитися від імпорتنих виробів.

Моделювання НДС показало, що позитивний вплив теплових змін (термоциклування) пов'язаний з локалізацією пластичних деформацій і розвитком деформацій зсуву у зоні стику, що є наслідком виникнення радіальних, колових і дотичних напружень з максимумом у площині стику. При цьому рівень еквівалентних напружень визначається відмінністю ТКЛР, температурним інтервалом теплових змін, об'ємними змінами при структурних перетвореннях та релаксацією напружень при деформаціях миттєвої пластичності і повзучості. Зовнішній тиск впливає на рівень та розподіл напружень і пластичних деформацій у з'єднанні.

Комп'ютерне моделювання дозволяє врахувати тип з'єднань, схему навантаження, ФМВ матеріалів тощо.

Розроблено технологію ДЗВ також інших деталей. Наприклад, при ДЗВ жароміцних нікелевих сплавів для розвитку в зоні стику пластичних деформацій зсуву використовуються зміни об'єму сплавів при виділенні або розчиненні зміцнювальних фаз. При з'єднанні дисперсійно зміцнюваних сплавів один з них знаходиться в стані аустенізації, другий – після старіння. Іншим варіантом є застосування проміжних прокладок,

## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

які знаходяться в іншому структурному стані, ніж основний метал. Це дозволяє отримати з'єднання без границі розподілу деталей по стику і зменшити в 1,5–2,0 рази тиск зварювання при однакових температурах. На рис. 2.44 показано мікроструктуру металу в зоні стику після ДЗВ жароміцних сплавів ЭП99 в стані після старіння та аустенітного сплаву ЭИ602.

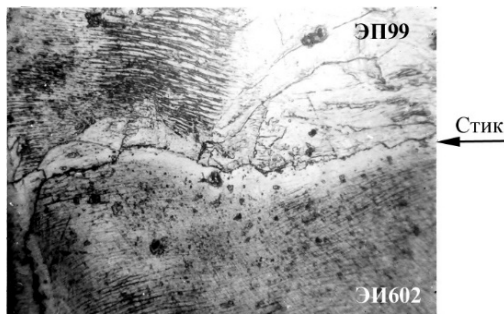


Рис. 2.44. Мікроструктура зварного з'єднання жароміцних нікелевих сплавів ЭП99 і ЭИ602;  $\times 300$

Мікроструктура зварного з'єднання на рис. 2.44 більш характерна для способів зварювання з високоінтенсивною деформацією, ніж для ДЗВ за традиційною схемою.

Ефективною виявилася підготовка з'єднуваних поверхонь у вигляді виступів і канавок, що правильно чергуються між собою, як показано на рис. 2.45,а. Кут розкриття канавок складав  $60^\circ$ . Цей тип з'єднання забезпечує деформацію зсуву по всій поверхні, але вимагає високої точності механічної обробки. Зварювання виконували при нагріванні однієї із заготовок до більш високої температури, що забезпечувало втиснення в неї клиноподібних виступів більш холодної заготовки. Мікроструктуру з'єднання показано на рис. 2.45,б.

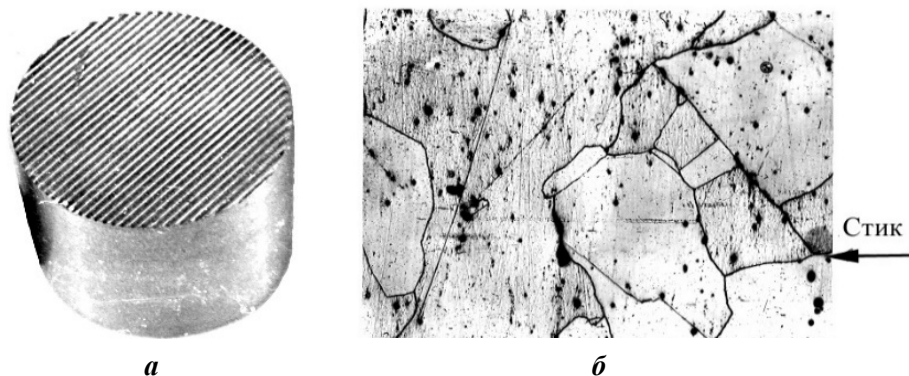


Рис. 2.45. Загальний вигляд зразка, підготовленого до зварювання (а), та мікроструктура з'єднання (б);  $\times 50$

## 2. 1. Дифузійне зварювання у вакуумі

В НУК ім. адмірала Макарова досліджено також інші способи реалізації деформації зсуву в зоні з'єднання, наприклад при стисненні деталей, нагрітих до різних температур, або при використанні прокладок, які нагріваються до більш високих температур (рис. 2.46,*а*) або в різному структурному стані (*б*).

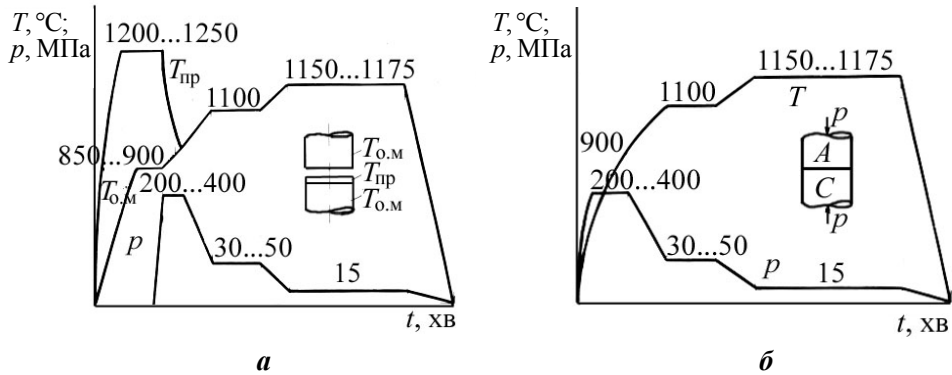


Рис. 2.46. Циклограми ДЗВ жароміцних нікелевих сплавів:  
*а* – зварювання з прокладкою, яка нагрівається до  $1200...1250$  °C;  
*б* – зварювання в різному структурному стані

При ДЗВ матеріалів з високим опором деформації використовують перфоровані прокладки [25], оскільки в суцільних прокладках деформації зсуву інтенсивно розвиваються лише на периферійних ділянках. Установлено, що на якість з'єднань суттєво впливають ступінь і швидкість деформації прокладки, які залежать від коефіцієнта перфорації. Вплив цих та інших факторів можна дослідити методом комп'ютерного моделювання НДС.

Надзвичайно важливе значення має формування НДС при ДЗВ металів з неметалами, наприклад з керамікою, ТКЛР яких відрізняються в декілька разів [54]. Аналогічна проблема існує при з'єднанні графіту з металами [20]. Унаслідок цього при охолодженні з'єднань виникають власні залишкові напруження, які можуть зруйнувати з'єднання. Для уникнення цих напружень застосовують узгоджені з'єднання, в яких кераміка і метал мають близькі ТКЛР, наприклад з використанням ковару 29 НК, однак при температурах вище  $450$  °C ТКЛР ковару різко зростає і при  $900$  °C перевищує ТКЛР кераміки в  $1,8$  рази. Тому навіть в узгоджених з'єднаннях після високотемпературного паяння при охолодженні рівень напружень може перевищувати допустимий.

Для отримання якісних з'єднань НДС вузлів повинен регулюватися з використанням факторів, що впливають на формування власних



## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

напружень, зокрема типу з'єднань, ФМВ, пластичних деформацій металу миттєвих і повзучості у всьому температурному інтервалі охолодження, параметрів режиму зварювання та охолодження тощо.

Врахувати роль відзначених факторів дозволяє комп'ютерне моделювання з використанням методу скінченних елементів. Авторами установлено, що в з'єднаннях кераміки з коваром у вузлах втулка-втулка охолодження під певним зовнішнім тиском призводить до збільшення пластичних деформацій (миттєвої пластичності і повзучості) ковару, перерозподілу і зниження напружень розтягу в кераміці, міцність якої при дії таких напружень мінімальна. Для інших матеріалів і вузлів необхідно проводити конкретні дослідження НДС.

### 2.1.4. Зварювальне устаткування

Для ДЗВ у вакуумі розроблено і створено більше 70 типів установок [18, 80]. Основними складовими будь-якої установки є вакуумна зварювальна камера, вакуумні насоси і система, джерело енергії для нагрівання та нагрівальний пристрій, пристрій для стискування, контрольно-вимірювальна апаратура та система керування. Установки можуть бути з повним вакуумуванням деталей або з місцевим при зварюванні великогабаритних виробів, наприклад труб. Залежно від форми і розмірів виробів, а також режимів зварювання, вибирають джерело нагрівання. Найбільш часто використовують індукційне нагрівання струмами високої частоти, однак можуть бути використані і такі способи нагрівання, як радіаційний, контактний, електронно-променевиий, лазерний, у полі тліючого розряду, комбінований тощо [18, 80]. Для стискування деталей застосовують гідравлічну, пневматичну та механічну системи, використовують розширення при нагріванні в жорсткому вузлі, термічний натяг при різнорідних сполученнях тощо. Установки можуть бути універсальними або спеціалізованими.

При виготовленні установок для дифузійного зварювання у вакуумі використовують стандартні джерела нагрівання і вакуумні насоси та агрегати. Нагрівання струмом високої частоти розглянуто в п. 1,5, а електронним променем та іншими джерелами енергії буде розглянуто далі. Тому нижче наведено відомості щодо принципу роботи та конструкції вакуумної техніки яка широко застосовується в промисловості для зварювання, паяння, плавлення, напилювання, термічної обробки тощо [64].

**Вакуумні насоси.** Вакуумні насоси працюють у діапазоні тисків від  $10^5$  до  $10^{-10}$  Па (рис. 2.47). При цьому використовується один із двох способів відкачки: 1) переміщення газу за рахунок механічних сил, які діють на нього; 2) зв'язування газу шляхом сорбції, хімічних реакцій або конденсації.

## 2. 1. Дифузійне зварювання у вакуумі



Рис. 2.47. Области дії вакуумних насосів

Вакуумні насоси за принципом дії поділяють на наступні групи:

1) об'ємної дії, в яких газ переміщується шляхом періодичної зміни об'єму робочої камери;

2) ежекторні, в яких газ захоплюється струменем робочої рідини або пари;

3) молекулярні, які надають своїми рухомими поверхнями молекулам газу додаткову швидкість у визначеному напрямку (турбомолекулярні насоси) або використовують постійно діючий струмінь пари (струминні насоси);

4) сорбційні, які видаляють гази сорбцією на поверхні або в об'ємі твердих тіл;

5) кріогенні, які видаляють гази шляхом їх конденсації на поверхнях, охолоджених до наднизьких температур. Різновидами кріогенних насосів є конденсаційні і криосорбційні насоси.

Сфери використання насосів різних груп наведено на рис. 2.47. Для технологічних процесів у промисловості зазвичай застосовують насоси першої, другої, третьої і четвертої груп. *Основні параметри вакуумних насосів* – найбільший тиск запуску, найбільший робочий тиск, найбільший випускний тиск, граничний залишковий тиск, швидкість дії і продуктивність.

*Найбільший тиск запуску* – найбільший тиск у вхідному перерізі, при якому насос може почати роботу. *Найбільший випускний тиск* – найбільший тиск у вихідному перерізі насоса, при якому він може вести відкачку. *Найбільший робочий тиск* – найбільший тиск у вхідному перерізі насоса, при якому він тривалий час зберігає номінальну швидкість дії.

## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

*Граничний залишковий тиск* – найменший тиск, який може бути досягнутий при роботі насоса на себе, тобто без навантаження. При цьому розрізняють парціальний тиск залишкових газів і повний залишковий тиск, тобто суму парціальних тисків залишкових газів і парів.

*Швидкість дії насоса* називається об'єм газу, що проходить через впускний переріз насоса в одиницю часу при визначеному тиску. Для кожного типу насосів існує крива залежності швидкості дії насоса  $S_H$  від тиску  $p_H$ .

*Продуктивність насоса*  $Q'_H$  – кількість газу, що видаляється в одиницю часу при тиску  $p_H$ . Продуктивність і швидкість дії насоса пов'язані співвідношенням

$$Q'_H = S_H p_H.$$

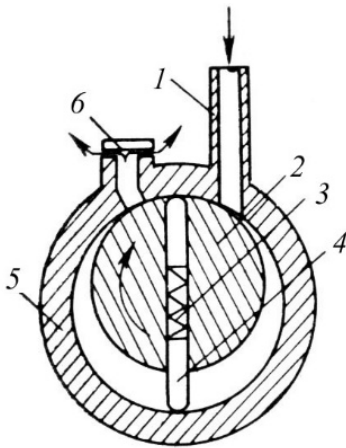


Рис. 2.48. Схема пластинчато-роторного насоса

Для відкачки повітря від атмосферного тиску і створення вакууму до 1 Па застосовують механічні насоси об'ємної дії з масляним ущільненням. Насоси з малою швидкістю дії (до  $6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ) звичайно виготовляють пластинчато-роторними (ВН-494) або пластинчато-статорними (ВН-461М). Середні (від  $6 \cdot 10^{-3}$  до  $10^{-1} \text{ м}^3/\text{с}$ ) і великі (понад  $10^{-1} \text{ м}^3/\text{с}$ ) насоси роблять плунжерними (золотниковими): ВН-1, ВН-6Г, НВЗ-100, НВЗ-150 та ін. Принцип дії механічних масляних насосів заснований на обертанні ексцентрично розташованого ротора в робочій камері, розділеній за допомогою ковзних лопатей, або самого ротора, розділеного на кілька секторів. При

обертанні ротора в одній частині камери створюється розрідження, а в іншій – стискування. Газ із відкачуваного об'єкта втягується в розріджену область робочої камери, а потім при зменшенні об'єму стискується до тисків, необхідних для відкриття випускного клапана і видалення газу в атмосферу. Схему пластинчато-роторного насоса показано на рис. 2.48. При обертанні ексцентрично розташованого ротора 2, пластини 4 із пружиною 3 ковзають по внутрішній поверхні циліндра 5. У порожнину всмоктування газ надходить із впускного патрубка 1, з'єднаного з об'ємом, що відкачується. З порожнини стискування газ виштовхується через випускний клапан 6. У процесі роботи зазори в роторному механізмі ущільнюються вакуумним маслом.

Схему плунжерного насоса показано на рис. 2.49. У циліндричній камері корпусу 1 насоса обертається ексцентрик 2 з надягнутим на нього плунжером 3. Газ із відкачуваного об'єму надходить у порожнину всмоктування через вікно 6 у прямокутній частині плунжера, що ковзає в напрямній 5. З порожнини стиску газ виштовхується через випускний клапан 4.

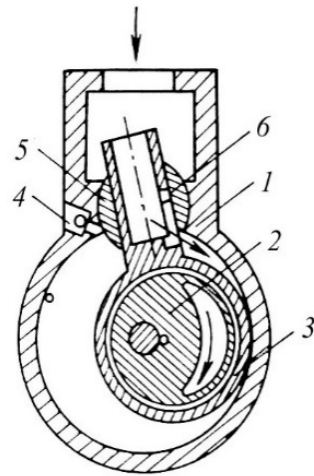


Рис. 2.49. Схема плунжерного (золотникового) насоса

В одноступінчастих насосах із масляним ущільненням повний залишковий тиск звичайно складає 2,0...6,6 Па. Для одержання більш низьких тисків використовують двоступінчасті насоси з масляним ущільненням. Високовакуумний ступінь двоступінчастого насоса, який з'єднується з відкачуванним об'ємом, створює невеликий перепад тисків (до 0,1 Па), і тому немає потреби в масляному ущільненні, що зменшує натікання продуктів розкладання масла і забезпечує досягнення низьких тисків.

У кращих зразків двоступінчастих насосів повний залишковий тиск газів складає  $6,5 \cdot 10^{-1}$  Па.

Для створення високого і надвисокого вакууму застосовують молекулярні струминні і турбомолекулярні насоси. Робота пароструминних вакуумних насосів заснована на видаляючій ежекційній дії струменя пари робочої рідини, яка, виходячи із сопла, має високу швидкість та захоплює молекули відкачуваного газу. Схему триступінчатого дифузійного паромасляного насоса показано на рис. 2.50.

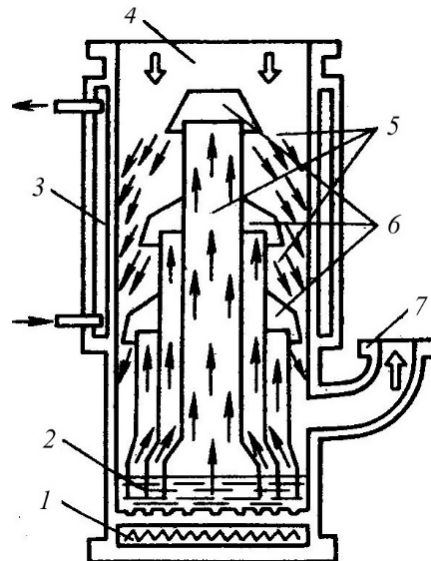


Рис. 2.50. Схема триступінчатого паромасляного насоса (рух пари показано стрілками):  
 1 – нагрівник; 2 – кип'ятильник з робочою рідиною (вакуумним маслом);  
 3 – система охолодження;  
 4 – відкачуваний газ; 5 – потік пари робочої рідини (вакуумного масла);  
 6 – зонтичні сопла 1-, 2- та 3-го ступенів;  
 7 – випускний патрубок

## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

Дифузійний насос являє собою корпус у вигляді циліндра з водоохолоджуваними стінками і глухим дном. У корпусі встановлено паропровід із соплами 6. Робоча рідина заливається на дно корпусу і підігрівається нагрівником 1. Пари рідини виходять із сопел з великими швидкостями і захоплюють молекули газу. При зіткненні з водоохолоджуваними стінками пари масла конденсуються, і робоча рідина стікає на дно насоса, а виділений газ видаляється через випускний патрубок 7, до якого приєднується механічний вакуумний насос або пароструминний бустерний (допоміжний) насос. Принцип роботи бустерних насосів такий же, як і високовакуумних дифузійних, однак у бустерних насосах забезпечується підвищена густина струменя масляної пари за рахунок застосування вакуумного масла з більшою пружністю пари та збільшення потужності нагрівника. Вони мають найбільшу швидкість дії в діапазоні тисків  $10 \dots 10^{-1}$  Па і застосовуються разом з механічними насосами.

Істотний недолік дифузійних насосів – міграція в робочий об'єм масляної пари, що змушує застосовувати спеціальні маслоуловлюючі елементи – пастки різного типу. Часто поєднують дифузійні насоси з пастками, охолоджуваними киплячим рідким азотом для конденсації пари масла.

У сучасних технологічних установках розширюється застосування турбомолекулярних вакуумних насосів. При роботі з ротаційними форвакуумними насосами турбомолекулярні насоси забезпечують граничний вакуум біля  $10^{-7}$  Па, а з ротаційними і дифузійними насосами –  $10^{-8}$  Па. Ефективність відкачки збільшується з ростом частоти обертання ротора, яка складає 18000 об/хв і більше. Схему турбомолекулярного насоса показано на рис. 2.51,а. Насос має статорні А і роторні В диски з косими радіальними каналами (див. рис. 2.51,б).

Канали роторних дисків В розміщені дзеркально відносно каналів статорних дисків А. Така система забезпечує проходження молекул газу в напрямку відкачки. Молекули газу, які проходять через статорний паз, вільно рухаються через роторний паз, оскільки бокова стінка 1 роторного паза відходить з їх шляху, а бокова стінка 2 роторного паза не наздоганяє їх. У той же час молекули, які підходять до роторного диска справа (проти напрямку відкачки), відбиваються стінкою 2 паза роторного диска В у напрямку відкачки.

Максимальна швидкість дії насосів досягається при кутах нахилу пазів відносно площини дисків близько  $30^\circ$ , але для досить високого стискування газів ці кути не повинні перевищувати  $20^\circ$ . Тому в сучасних насосах високовакуумні ступені виконуються з кутами нахилу  $35^\circ$ , а решта –  $20 \dots 15^\circ$ . Високий коефіцієнт стискування ( $102 \dots 103$  по водню,  $107 \dots 109$  по азоту) забезпечується завдяки великій кількості послідовних ступенів ( $30 \dots 40$ ). Оскільки для важких газів коефіцієнт стискування дуже великий, то проникнення важких молекул масел форвакуумних порожнин насоса до відкачуваних об'єктів неможливе.

## 2. 1. Дифузійне зварювання у вакуумі

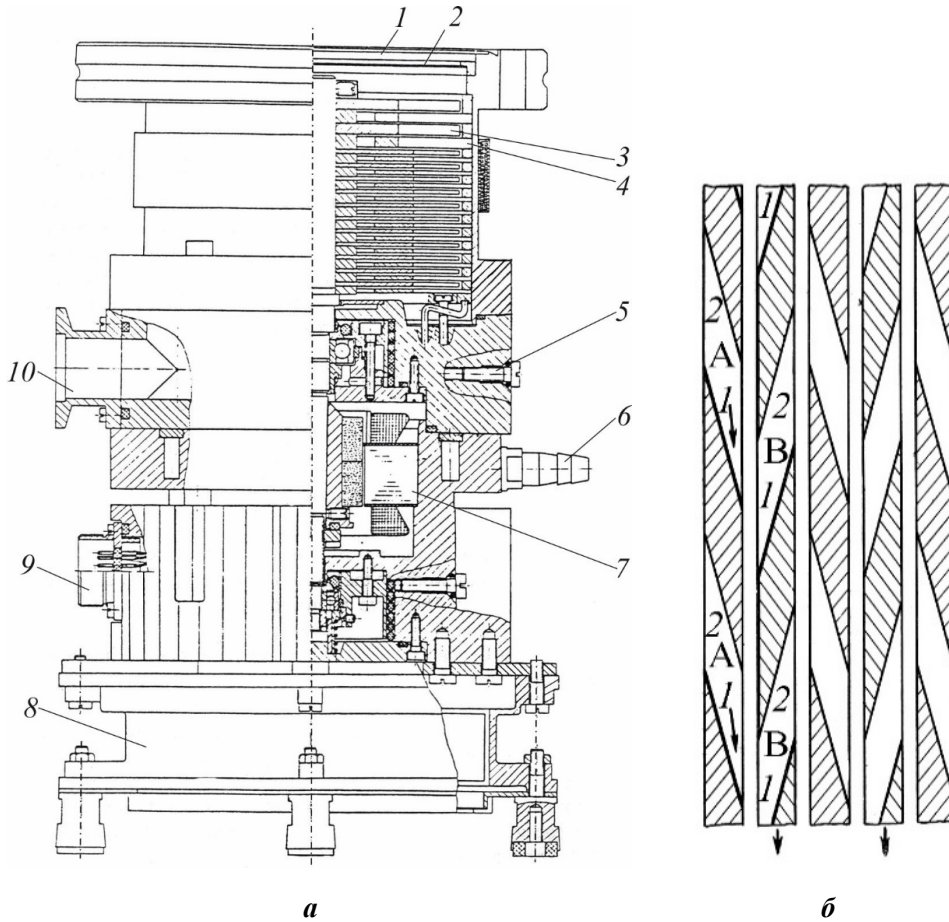


Рис. 2.51. Принципова схема турбомолекулярного насоса (а) та розміщення статорних і роторних дисків та їх каналів (б):

- 1 – фланець з'єднання з робочою камерою; 2 – фільтр; 3 – ротор; 4 – статор;  
 5 – масляна система; 6 – система охолодження; 7 – електродвигун; 8 – вентилятор;  
 9 – електрична розетка; 10 – фланець з'єднання з форвакуумною системою

У системах безмасляної відкачки та для одержання досить низьких тисків широко застосовують сорбційні насоси, зокрема випарні гетерні насоси. У цих насосах поглинання газів здійснюється за рахунок фізичної адсорбції, хемосорбції, хімічних реакцій і розчинення газів у парах та плівці металевого гетера, створюваних методом термічного випаровування. Як гетер звичайно використовують титан, який утворює нелеткі з'єднання або тверді розчини майже з усіма газами, за винятком інертних газів і вуглеводнів.

Найбільш високу швидкість дії мають дугові гетерні насоси. Схему дугового насоса наведено на рис. 2.52.

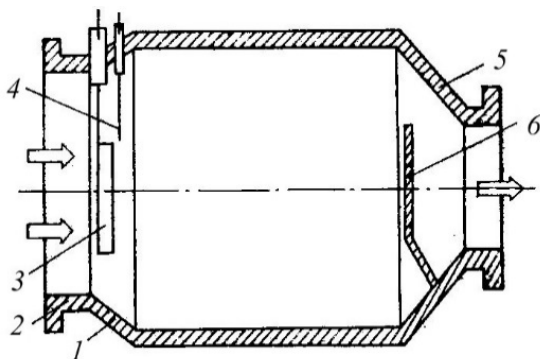


Рис. 2.52. Схема електродугового гетерного насоса

Випаровування титану відбувається за допомогою електродугового розряду між катодом і анодом. Анодом служить корпус 1 насоса, катодом – титановий диск 3. Випаровування титану обумовлене високою концентрацією енергії в катодній плямі електричної дуги постійного струму. Густина струму в плямі досягає  $10^{10} \dots 10^{11}$  А/м<sup>2</sup>. Катодна пляма безперервно хаотично переміщується по поверхні катода, забезпечуючи рівномірне випаровування титану з поверхні диска. Титановий диск підтримується інтегрально холодним. Збудження дуги відбувається спеціальним електродом 4. Оскільки дуга горить у парах титану, то вона зберігає свою стабільність при будь-якому низькому тиску залишкових газів. Напруга збудження дуги складає 25...35 В, сила струму стабільного горіння дуги – 120...140 А при напрузі 20...21 В.

Швидкість випаровування титану  $(3,6 \dots 4,7) \cdot 10^{-6}$  кг/с. Для зменшення швидкості випаровування з метою більш економного використання титану застосовують періодичний режим горіння дуги. При цьому, чим нижчий тиск залишкових газів, тим довшою пауза між моментами увімкнення насоса. При випаровуванні титану на стінках насоса безперервно утворюється свіжа активна плівка, що поглинає активні гази. Насос має відбивач 6 і впускний патрубок 2. Для відкачки інертних газів до впускного патрубку 5 приєднується паромасляний дифузійний насос, швидкість дії якого повинна складати 2...5 % швидкості дії електродугового насоса. Швидкість дії електродугових насосів складає 10...100 м<sup>3</sup>/с при тиску  $10^{-4}$  Па, граничний залишковий тиск при відкачці інертних газів складає  $10^{-6}$  Па.

Високий вакуум із відкачкою інертних газів можна отримати також використовуючи іонно-гетерні та магнітні електрорядні насоси. Принцип дії іонно-гетерних насосів заснований на поглинанні газів плівкою тита-

## 2. 1. Дифузійне зварювання у вакуумі

ну, яка періодично або безперервно наноситься з одночасною відкачкою інертних газів і вуглеводнів шляхом їх іонізації та уловлювання позитивних іонів. Іонізація здійснюється електронами, які емітують термокато́д. Граничний залишковий тиск іонно-гетерних насосів складає близько  $10^{-7}$  Па. Швидкість дії максимальна в діапазоні  $10^{-4} \dots 10^{-6}$  Па і складає у насосів ГИН-05М1 – 0,45 м<sup>3</sup>/с, у ГИН-5 4,5 м<sup>3</sup>/с. Результатом розвитку іонно-гетерних насосів стали орбітронні іонно-гетерні насоси, в яких за рахунок збільшення пробігу електронів інтенсивність іонізації газу різко збільшується.

Магнітні електророзрядні насоси, на відміну від іонно-гетерних, не мають високотемпературних елементів електродної системи. Для одержання активних плівок і для іонізації газів у них використовується електричний розряд та викликане ним катодне розпилення титану. Електрична система (анод і катод) розміщується в магнітному полі, перпендикулярному до поверхні катода. За наявності на електродах різниці потенціалів у декілька кіловольт між ними утворюється електричний розряд, який завдяки магнітному полю стабільно підтримується в широкому діапазоні тисків. Позитивні іони газів, що утворюються внаслідок зіткнення електронів із молекулами, прискорюються електричним полем у напрямку катода і проникають у нього, викликаючи розпилення матеріалу катода (титану). Розпилений титан осідає головним чином на аноді. Активні гази (азот, кисень) зв'язуються на свіжоутвореній на аноді плівці в стабільні хімічні сполуки (нітриди, оксиди). Аргон відкачується завдяки адсорбції його іонів на катоді. Такі насоси можуть бути неохолоджувані типу НМД і охолоджувані типу НМДО. Швидкість дії різна, наприклад у НМД-1 складає 1,2 м<sup>3</sup>/с, у НМД-0-0,63-1 – 0,6 м<sup>3</sup>/с. Ці насоси досить складні в експлуатації, мають тривалий період запуску, а також, як і іонно-гетерні, негативно реагують на різке підвищення тиску. Тому для технологічних процесів найбільш широко використовують гетерні випарувальні насоси.

Сучасний рівень розвитку вакуумної техніки дозволяє комплектування необхідними насосами будь-яких технологічних установок залежно від технічного завдання.

**Зварювальні установки.** В установках для дифузійного зварювання у вакуумі  $10^{-2}$  Па звичайно застосовують механічні насоси об'ємної дії і дифузійні паромасляні насоси. Схему установки УДСВ-ДТ, яку призначено для ДЗВ деталей турбін з нагріванням струмами високої частоти в робочій камері об'ємом 54 л, показано на рис. 2.53.



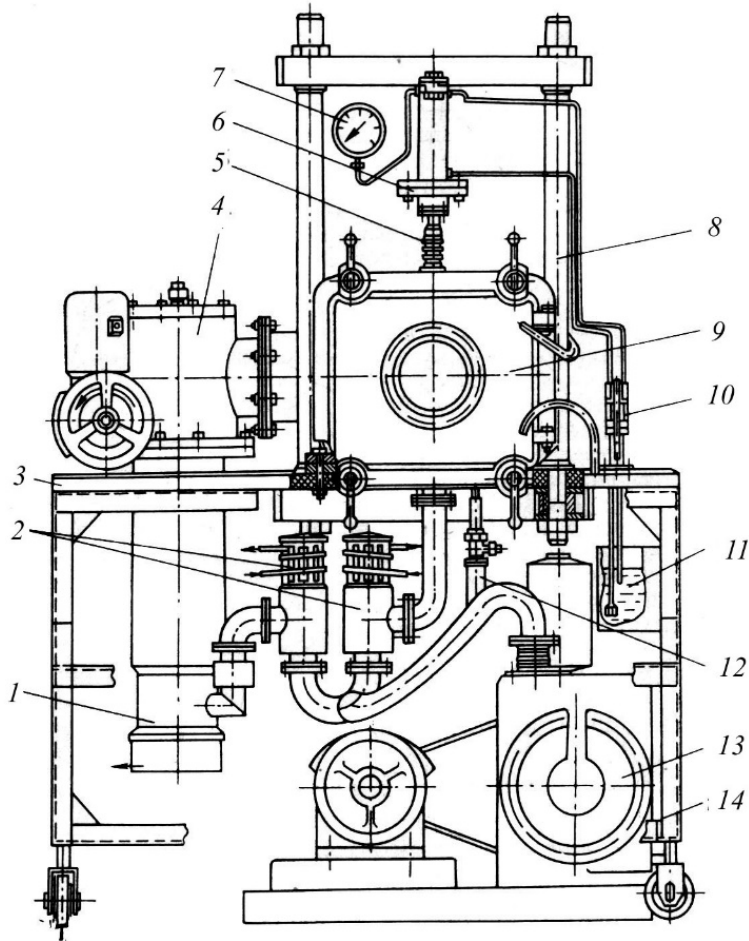


Рис. 2.53. Схема вакуумної установки УДСВ-ДТ для дифузійного зварювання деталей лопаток газових турбін

Установка має форвакуумний насос *13* типу ВН-1МГ, дифузійний насос *1* типу Н5-СМ1, електромагнітний кран *12* для напуску повітря в камеру *9*, масляний бак *11* і два вакуумних електромагнітних крани *2*, один з яких служить для з'єднання форвакуумного насоса з робочою камерою, а другий – для з'єднання з дифузійним насосом. На текстолітовій плиті *3*, розміщеній на каркасі *14*, установлена робоча вакуумна камера *9*, ручний гідравлічний насос *10* і вузол гідравліки, що складається з двох колон *8*, з'єднаних верхньою і нижньою траверсами. До верхньої траверси кріпиться трипоршневий гідравлічний циліндр *6*, що забезпечує стискування деталей і підйом штоків. Тиск масла в гідросистемі вимірю-

## 2. 1. Дифузійне зварювання у вакуумі

ють манометром 7. Зусилля стискування від поршнів гідроциліндра передається на деталі через три штоки, які розташовані в одній площині і введені у вакуумну камеру через сильфонні ущільнення 5. Три штоки дозволяють рівномірно розподіляти зусилля по великій площі зварювання. Максимальне зусилля стискування деталей складає 50 кН. Воно створюється за допомогою ручного гідравлічного преса 6 з максимальним тиском масла 15 МПа.

Зварюються деталі у вакуумній камері 9. Вона має оболнку для водяного охолодження. Відкидна передня стінка з оглядовим вікном зі спеціального скла має діаметр 160 мм. Вакуумна камера з'єднана з дифузійним насосом 1 через вакуумний затвор 4 типу ДУ-160. Попередній вакуум у робочій камері створюється форвакуумним насосом 13, а високий вакуум – дифузійним паромасляним насосом 1. Вакуум  $1,3 \cdot 10^{-2}$  Па створюється в робочій камері за 5 хв.

Робота на установці ведеться в такій послідовності. Перед зварюванням деталі зачищають і знежирюють. Підготовлені до зварювання деталі встановлюють у камеру 9. Відкачування повітря до тиску в 13,3 Па ведеться форвакуумним насосом 13, а потім дифузійним 1. Коли досягнуто необхідного вакууму, деталі нагрівають до температури зварювання. В установці передбачене індукційне нагрівання деталей струмами високої частоти.

При досягненні необхідної температури зварювання деталі стискають заданим зусиллям і витримують у такому стані протягом визначеного часу. Час зварювання звичайно складає кілька хвилин.

Після закінчення зварювання закривають вакуумний затвор 4, відкривають кран 12 напуску повітря в камеру. При цьому форвакуумний насос відкачує повітря з дифузійного насоса. У робочій камері ведеться вивантаження-завантаження деталей.

Аналогічно побудовані інші установки з індукційним нагріванням, більшість з яких розроблено в Проблемній лабораторії ДЗВ і відомі під назвою СДВУ (СДВУ-21, СДВУ-24, СДВУ-ЗОЛ, СДВУ-50 тощо) [18, 80]. Електронно-променево джерело нагрівання має установка А30К.14, радіаційне нагрівання – установки СДВУ-38, СДВУ-40, А306.21, А308.13. Для зварювання дроту будь-якої довжини призначена установка СДВУ-21. Установки СДВУ-15-2, А306.06, УДС-3 мають дві зварювальні камери. Перераховані зварювальні установки працюють при вакуумі до  $1,3 \cdot 10^{-2} \dots 6,6 \cdot 10^{-3}$  Па.

Схему надвисоковакуумної установки ВВУ-1Д, створеної в НУК (раніше УДМТУ) спільно з НВО "Енергія", показано на рис. 2.54, а загальний вигляд на рис. 2.55.

## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

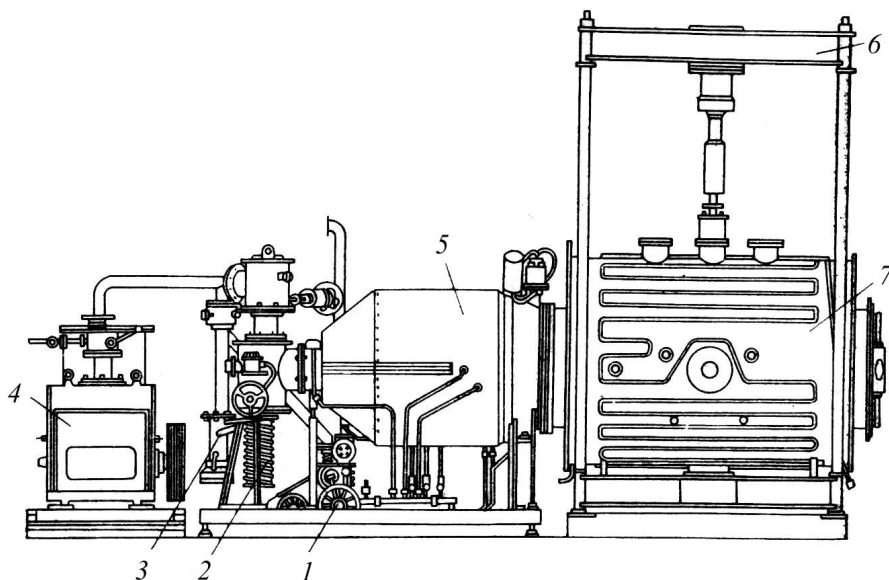


Рис. 2.54. Схема надвисоковакуумної установки ВВУ-1Д:  
1 – форвакуумний насос НВЗ-20; 2 – вакуумний агрегат АВП-2;  
3 – бустерний насос БН-3; 4 – форвакуумний насос ВН-6ГМ;  
5 – електродуговий вакуумний насос АВЭД-40/80;  
6 – вузол гідравліки; 7 – вакуумна камера



Рис. 2.55. Загальний вигляд універсальної надвисоковакуумної установки ВВУ-1Д

## *2. 1. Дифузійне зварювання у вакуумі*

Універсальну установку ВВУ-1Д, яка є надвисоковакуумним технологічним комплексом, призначено для дифузійного зварювання і паяння складних за конфігурацією та громіздких вузлів із тугоплавких і активних металів, жароміцних сплавів, композиційних і керамічних матеріалів, нанесення покриттів і припоїв методами іонно-плазмового та термічного напилення. Об'єм робочої камери складає  $3,53 \text{ м}^3$ , максимальна температура деталей –  $1600 \dots 1800 \text{ }^\circ\text{C}$ . В установці передбачено радіаційне нагрівання та нагрівання струмами високої частоти. Потужність нагрівального пристрою складає 120 кВА. Зусилля стиснення 100 кН.

Вакуумну камеру оснащено допоміжними механічними маніпуляторами та механізованими пристроями, які забезпечують виконання технологічного циклу виготовлення партії деталей без розгерметизації камери.

В установці ВВУ-1Д вакуум  $10^{-5} \dots 10^{-6} \text{ Па}$  створюється за допомогою форвакуумних насосів НВЗ-20 і ВН-6ГМ, бустерного насоса БН-3, вакуумного агрегату АВП-2 та електродугового вакуумного насоса АВЭД-40/80. Форвакуумний насос ВН-6ГМ відкачує з камери повітря до 13,3 Па і потім вимикається. Подальша відкачка ведеться насосами НВЗ-20, БН-3, АВП-2 і АВЭД-40/80. Більш детально будову установки ВВУ-1Д розглянуто в роботі [60], а інших установок – у роботах [22, 23].

### *2.1.5. Особливості та сфери застосування дифузійного зварювання у вакуумі*

Основною особливістю дифузійного зварювання є можливість регулювання в широких інтервалах параметрів режиму, що дозволяє з'єднувати практично будь-які матеріали без зміни їх будови та властивостей. При цьому необхідно враховувати важливий вплив на процес зварювання не лише температури, тиску, часу і середовища, але й підготовки з'єднувальних поверхонь. Так, якщо при зварюванні напівпровідників не допускаються пластичні деформації або при з'єднанні магнітів є певна максимально допустима температура, то особливу роль відіграють способи підготовки поверхонь і їх активації, вакуум або газове середовище та їх взаємозв'язок з основними параметрами режиму зварювання. Наприклад, у табл. 2.2 наведено два режими зварювання міді з нікелем при температурах  $900$  та  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ , але при нижчій температурі для отримання вакуумнощільного з'єднання проводилися ретельна підготовка поверхні та зварювання в надвисокому вакуумі  $10^{-6} \text{ Па}$ . При зварюванні магнітів для зниження температури використовують певні прокладки або гальванічні покриття міддю. При з'єднанні різнорідних металів, які утворюють крихкі прошарки, застосовують проміжні метали. Це забезпечує можливість з'єднання практично будь-якої комбінації металів, сплавів і неметалів.

## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

---

При зварюванні у вакуумі поверхня деталей не тільки захищається від подальшого забруднення, наприклад газами, оксидами, але й очищується в результаті процесів десорбції, дисоціації, сублимації або розчинення оксидів та дифузії їх углиб металу. Дифузійне зварювання у вакуумі не потребує спеціальних дротів, електродів, припоїв, флюсів, захисних газів тощо.

Основні параметри дифузійного зварювання – температура, тиск, вакуум і час зварювання – легко контролюються та програмуються, що дозволяє зменшити роль людського фактора при ДЗВ. Досить важлива особливість ДЗВ – можливість отримання багатошарових з'єднань деталей по великій площі, незалежно від їх товщини, з внутрішніми каналами будь-якої форми.

Дифузійне зварювання дозволило в 10–12 разів підвищити термін служби, якість і надійність ряду деталей, розробити принципово нові конструкції машин, приладів, спростити технологію та замінити дефіцитні і дорогі матеріали, а також скоротити обсяг їх витрат шляхом виготовлення композиційних виробів. За допомогою дифузійного зварювання отримано та освоєно в промисловому виробництві з'єднання таких пар металів і сплавів, які виконати іншими видами зварювання надзвичайно складно. Виготовлено вироби складної конфігурації або по великій площі з'єднання. Розроблено технології ДЗВ жароміцних, високолегованих, тугоплавких і активних металів, надтвердих, твердих сплавів та неметалічних матеріалів: кераміки, кварцу, скла, графіту, ситалу, сапфіру тощо в однорідному та різномірному з'єднаннях [15, 18, 52, 80].

Дифузійне зварювання від багатьох інших способів зварювання відрізняють висока гігієнічність, відсутність ультрафіолетового випромінювання, шкідливих газових виділень, пилу тощо. Витрати енергії в 4...6 разів менші, ніж при контактному зварюванні одних і тих же деталей, а ресурс роботи останніх значно більший.

Спосіб дифузійного зварювання знайшов застосування в найрізноманітніших галузях промисловості для одержання як мініатюрних, так і великогабаритних виробів з металів, кераміки, скла та інших матеріалів. За його допомогою виготовляють такі складні і точні конструкції, як апарати, плаковані сріблом для хімічної промисловості, металокерамічні конструкції, вузли з фериту і металокераміки, високостійкі штампи, пружні елементи датчиків, вольфрамові сопла літальних апаратів, багатошарові панелі, модулі пневмоніки, колеса турбін радіального типу, лопатки турбін, пористі трубки для хімічної і газової промисловості, клапани,

гільзи циліндрів двигунів, ювелірні вироби та багато іншого. У судновому машинобудуванні за допомогою дифузійного зварювання виготовляють елементи катодного захисту з платиново-титановими анодами підвідної частини корпусу судна і гребних гвинтів від корозійних руйнувань, деталі з жароміцних нікелевих сплавів, для яких перспективною є модифікація та легування поверхні з використанням обробки високострумовим електронним пучком [89] або високоенергетичним плазмовим потоком [93].

Недолік дифузійного зварювання – велика тривалість процесу. Для усунення цього недоліку розроблено багатопозиційні і багатокамерні (роторного типу) установки, установки безперервної дії зі шлюзуванням, зі спеціальними завантажувальними бункерами, розміщеними в робочій камері, а також здійснюється інтенсифікація процесу зварювання із застосуванням високих швидкостей деформування, термоциклування, проміжних прокладок, у тому числі високодисперсних порошків та інших заходів.

Застосування дифузійного зварювання і надалі буде сприяти технічному прогресу в різних галузях техніки. Важливе значення воно має при створенні і зварюванні композиційних та багатошарових матеріалів, сфера застосування яких постійно зростає.

## 2.2. Зварювання прокатуванням

*Зварювання прокатуванням (welzschweissen; roll welding; сварка прокаткой)* – це зварювання тиском, що виконується прокатними валками, які деформують попередньо нагріті від зовнішнього джерела тепла заготовки.

*Основними параметрами зварювання прокатуванням (ЗП)* є температура та величина деформації при прокатуванні (величина обтиснення пакета), але важливе значення має середовище прокатування. Найбільш досконалим захистом металів від повітря є вакуум, використовують також інертні або активовані газові середовища. Застосовують прокатування в спеціальних оболонках та в умовах автовакууму.

Спосіб зазвичай використовується для отримання біметалів або багатошарових металів. Температуру нагрівання вибирають таким чином, щоб вона була нижчою від температури плавлення найлегкоплавкішого металу або контактного плавлення будь-якої пари металів, тобто щоб з'єднання відбувалося в твердому стані. Ці температури для деяких пар металів наведено в табл. 2.5 [10].

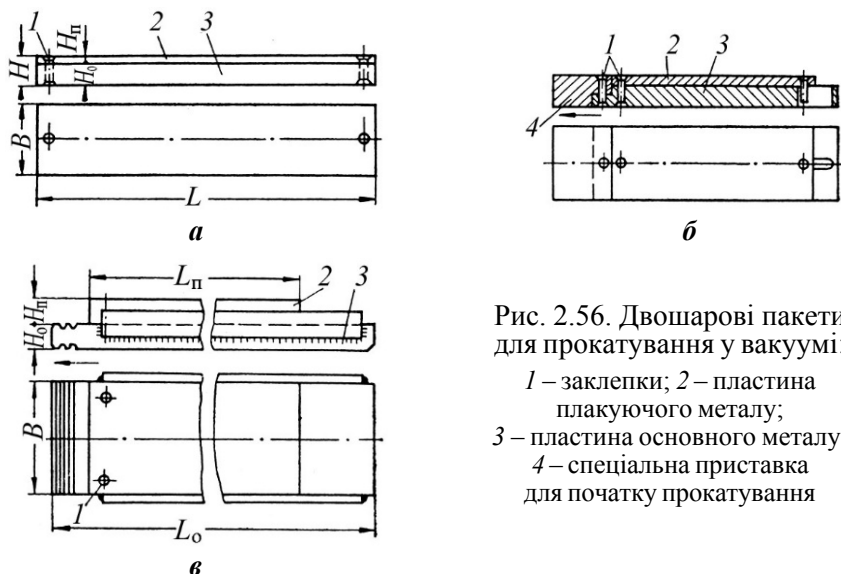
## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

**Таблиця 2.5. Температури плавлення (°C) металів або їх легкоплавких твердих розчинів (*m*) і евтектик (*e*)**

Метали	Cr	Cu	Fe	Mo	Nb	Ni	Ta	Ti	V	Zr
Cr	1800	1075, <i>e</i>	1507, <i>m</i>	1860, <i>m</i>	1600, <i>e</i>	1345, <i>e</i>	1700, <i>e</i>	1390, <i>e</i>	–	1300, <i>e</i>
Cu	–	1083	1083	1083	1083	1083	1083	880, <i>e</i>	1083	885, <i>e</i>
Fe	–	–	1535	1440, <i>e</i>	1360, <i>e</i>	1440, <i>e</i>	1410, <i>e</i>	1085, <i>e</i>	1470, <i>m</i>	934, <i>e</i>
Mo	–	–	–	2620	2300, <i>m</i>	1315, <i>e</i>	2620	1660	1100, <i>m</i>	1520, <i>e</i>
Nb	–	–	–	–	1470	1175, <i>e</i>	2470, <i>m</i>	1660, <i>m</i>	1810, <i>m</i>	1600, <i>m</i>
Ni	–	–	–	1320, <i>e</i>	1175, <i>e</i>	1453	1360, <i>e</i>	942, <i>e</i>	1203, <i>e</i>	961, <i>e</i>
Ta	–	–	–	–	–	–	3300	1660, <i>m</i>	1900, <i>m</i>	1850, <i>e</i>
Ti	–	–	–	–	–	–	–	1660	1620, <i>m</i>	1610, <i>m</i>
V	–	–	–	–	–	–	–	–	1900	1230, <i>e</i>
Zr	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1800

*Біметал* – матеріал, який складається з декількох шарів різнохідних металів, між якими по всій контактній поверхні існує металічний зв'язок, а тому біметал має властивості його складових, яких не має монометал. Використання біметалів забезпечує значну економію дефіцитних металів. Тому біметали та багатошарові матеріали знаходять все більш широке застосування в промисловості.

Заготовки для отримання біметалів звичайно являють собою пакет, зібраний із двох пластин відповідних металів. Для отримання багатошарових матеріалів пакет складають із певної кількості пластин, які на обох кінцях скріплюються заклепками або гвинтами, якщо пластини при прокатуванні деформуються приблизно однаково (рис. 2.56, *a*).



**Рис. 2.56. Двошарові пакети для прокатування у вакуумі:**

- 1* – заклепки; *2* – пластина плакуючого металу;
- 3* – пластина основного металу;
- 4* – спеціальна приставка для початку прокатування

## 2. 2. Зварювання прокатуванням

Відносно широкі пакети скріплюють двома заклепками на передньому кінці, тобто зі сторони початку прокатування. Якщо очікується значна нерівномірність деформації шарів, то для вільного подовження при прокатуванні в пластині, яка деформується менше, робиться паз (див. рис. 2.56,б), а пластина, як більше деформується, робиться короткою (в). Оскільки при прокатуванні біметалічних пакетів звичайно відбувається значний вигин, то зі сторони початку прокатування встановлюють спеціальні приставки (див. рис. 2.56,б,в). При прокатуванні пакетів значних розмірів із приблизно однаковою товщиною м'якого та твердого металів (наприклад, перехідників сталь + титан) обмежують бокове розширення м'якого металу (див. рис. 2.56,в) зсуву у бік.

Складання пакетів ведуть перед прокатуванням. З'єднані поверхні пластин зачищають металічною щіткою перед складанням пластини та заклепки знежирюють ацетоном.

Насичення приповерхневого шару металів газами значно зменшує границю пластичності металу. Тому найбільш перспективними є процеси, при яких нагрівання, прокатування та охолодження відбуваються в глибокому вакуумі, що особливо важливо для високоактивних металів. У роботі [20] встановлено, що газонасичення та окиснювання титану залежать не лише від глибини вакууму, але і від величини зазору між пластинами (рис. 2.57).

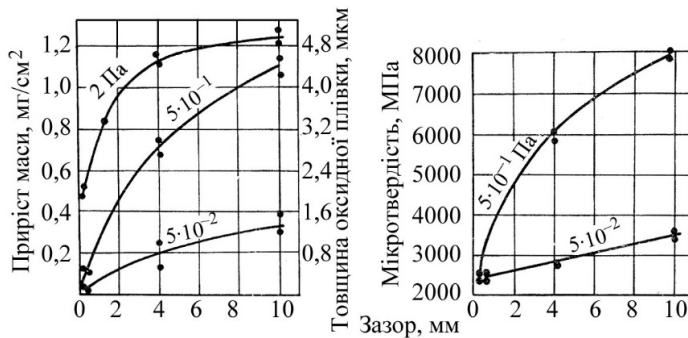


Рис. 2.57. Вплив величини зазору між пластинами на приріст маси і товщину оксидної плівки (а) та мікротвердість приповерхневого шару (б) пластини титану розміром 20×20×3 мм, що знаходилася під стальними пластинами

Температура ЗП повинна бути, у крайньому разі, на 40...50 °С нижчою від найнижчої температури плавлення. При виборі температури ЗП необхідно враховувати також вплив температури на ріст зерна та дифузійні процеси.

Величина обтиснення при прокатуванні повинна бути меншою від границі пластичності, яка визначається відносним обтисненням  $\Delta H/H$ ,



## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

при якому починається порушення суцільності металу в даних умовах деформації ( $H$  – початкова товщина). При прокатуванні не допускається утворення інтерметалідів.

Для попередження газонасиченню та окисненню металу застосовують прокатування в сталевих оболонках та нагрівання в попередньовакуумованих ампулах, соляних ваннах, середовищі водню або інертних газів, але сама деформація на повітрі погіршує властивості металів та з'єднання.

При нагріванні пластин сталі і титану ВТ1-1 у вакуумі  $10^{-3} \dots 10^{-2}$  Па різниці в стані зовнішньої поверхні титану і поверхні, яка контактувала зі сталлю, не спостерігалось, але при  $10^{-1}$  Па величина зазору суттєво впливала на стан поверхні титану. Нагрівалися пластини протягом 1 год при температурі  $1000$  °С та натіканні  $9,1 \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ .

У малому зазорі при нагріванні склад газу змінюється. Молекули кисню взаємодіють із титаном, окиснюючи його; азот при температурі  $1000$  °С реагує з титаном мало. Тому азот у зазорі надалі перешкоджає проникненню кисню. Чим менший зазор, тим меншим є окиснювання титану. Тому щільний контакт пластин титану і сталі при нагріванні сприяє підвищенню якості зварних з'єднань при прокатуванні.

Вплив величини пластичної деформації при прокатуванні різних біметалів показано на рис. 2.58 [11].

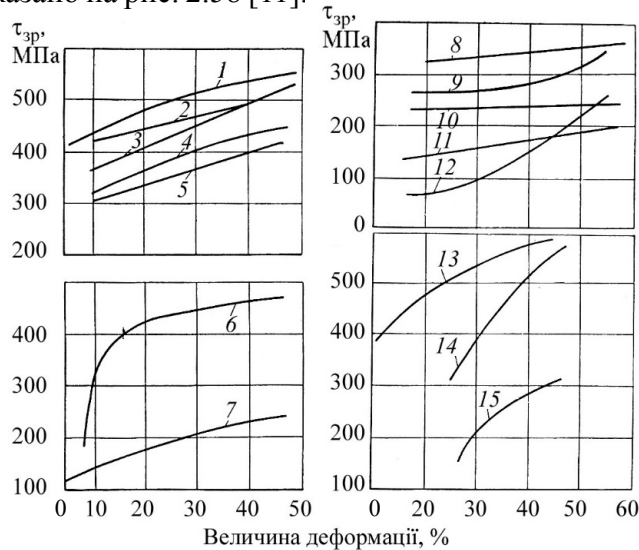


Рис. 2.58. Залежність міцності на зріз з'єднань біметалів від величини обтиснення пакета при температурах:

- 1 – Ст3 + 1Х18Н9Т при температурі  $1200$  °С; 2–5 – залізо + 1Х18Н9Т при температурах. °С: 2 –  $1320$ , 3 –  $1120$ , 4 –  $1200$ , 5 –  $1020$ ;  
 6 – залізо + нікель Н1 при  $1100$  °С; 7 – Ст3 + мідь при  $1000$  °С;  
 8 – Тi + Zr при  $880$  °С; 9 – Тi + Та при  $1200$  °С; 10 – Тi + Nb при  $1200$  °С;  
 11 – Тi + Cu при  $780$  °С; 12 – Тi + Мо при  $1200$  °С; 13 – Мо + Nb при  $1200$  °С;  
 14 – Nb + Тi при  $1100$  °С; 15 – Zr + Nb при  $960$  °С

З рисунка видно, що збільшення величини деформації підвищує міцність з'єднань. При плакуванні заліза нікелем при температурі 1100 °С висока міцність з'єднань досягається при деформації 15 %, а при плакуванні сталі Ст3 міддю при 1000 °С – уже при 5 %, причому руйнування біметалу Ст3 + мідь проходить по міді.

Дослідженнями з'єднань титану ВТ1 з міддю М1 встановлено, що при деформації 15 % відбувається дифузійне зварювання металів з утворенням міцного з'єднання [11]. При прокатуванні двох пластин із жароміцного нікелевого сплаву ЭИ602 при температурі 1200 °С і обтисненні пакета 30...40 % границі листів на мікроструктурі не виявлено, а міцність з'єднань була близькою до міцності основного металу. Аналогічні результати отримано при зварюванні між собою сталі Ст3 при 1200 °С з обтисненням в обох випадках 20 % і більше.

Для підвищення якості з'єднання при прокатуванні біметалу в ряді випадків використовують прошарки (підшари), принципи вибору яких ті ж самі, що і при дифузійному зварюванні.

Забезпеченню високої якості з'єднань при деформації прокатуванням або під дією певної стискної сили сприяє використання явища утворення вакууму в ізольованому об'ємі внаслідок взаємодії газів повітря з металами та довільного очищення металічних поверхонь від оксидів при нагріванні металів в умовах, які виключають безперервний доступ нових порцій повітря до їхніх поверхонь. Це явище було виявлено в ІЕЗ ім. Є.О. Патона.

Схема зварювання з довільним очищенням металу від оксидних плівок полягає в тому, що зазор між деталями герметизують шляхом обварювання по контуру. Потім деталі з герметизованим зазором нагрівають і деформують зовнішнім тиском або прокатуванням. Зварювання за цією схемою в ІЕЗ було названо *автовакуумним зварюванням тиском*. Гаряче прокатування з двох металів та з великою кількістю шарів за схемою автовакуумного зварювання тиском успішно використовується в металургії.

### 2.3. Інші способи зварювання тиском

*Ударне зварювання (schlag schweissen; percussion welding; ударная сварка) у вакуумі* розроблено в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. Зварювання виконували у вакуумі з локальним нагріванням деталей у зоні з'єднання електронним променем зі швидкістю біля 20 °С/с до температури вище 0,5  $T_{пл}$ . На відміну від традиційної схеми ДЗВ, при ударному зварюванні у вакуумі (УЗВ) *стиснення з'єднуваних поверхонь проводять при одноразовій імпульсній дії інструменту, що рухається зі швидкістю 1...30 м/с.*

## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

Для цього ззовні вакуумної камери є вантаж, який вільно або вимушено з певним прискоренням падає на шток. При цьому час спільного деформування металів при високій температурі зводиться до частки секунди. Величина пластичної деформації не перевищує 10...15 %. Енергія удару при вільному падінні вантажу визначається масою вантажу і висотою його падіння.

*Параметрами режиму УЗВ є температура нагрівання, енергія удару та швидкість навантаження.* Для вирівнювання температури по глибині поверхневого шару та очищення поверхні від оксидів перед стисненням проводять ізотермічну витримку.

При з'єднанні різнорідних металів, які утворюють інтерметалідні фази, УЗВ сприяє диспергації та розосередженню цих фаз у досить широкій зоні зварювання. Наприклад, при УЗВ алюмінію з міддю проникнення Al в Cu досягає 30 мкм, тоді як Cu в Al не перевищує 3 мкм. При зварюванні титанового сплаву BT16 зі сталлю 12X18H10T проникнення елементів сталі в титановий сплав складає 2,5...5,0 мкм, а титану в сталь – 7...10 мкм. При певних швидкостях деформації спостерігається аномальне перенесення атомів впровадження. Ударне зварювання у вакуумі доцільно застосовувати для з'єднання різнорідних металів з обмеженою взаємною розчинністю, наприклад його успішно використовують при виготовленні трубчатих перехідників з різнорідних металів (титан-сталь). Таке зварювання перехідників виконують з локальним вакуумом у зоні зварювання, який створюють за допомогою спеціальних муфт.

*Зварювання з використанням електричного вибуху провідника у вакуумі* виконується у твердому стані з проміжним прошарком, який отримують шляхом конденсації на з'єднуваних поверхнях високотемпературної парової плазми, що утворюється внаслідок пропускання потужного імпульсу електричного струму високої густини (до  $10^5$  А/мм<sup>2</sup>) через провідник за час біля  $10^{-6}$  с.

В одному з варіантів прошарок наноситься на вільні поверхні деталей, розмішені на певній відстані з двох сторін провідника, через який пропускається електричний струм. Залежно від площі з'єднання використовуються один або декілька провідників. Для забезпечення міцного зв'язку між прошарком і поверхнею деталі остання підігривається до певної температури. Надалі процес зварювання нічим не відрізняється від ДЗВ. Тиск і температура підігріву деталей залежать від матеріалів. При зварюванні кераміки рекомендується температура підігріву біля 400 °С при тиску не менше 10 МПа.

В іншому варіанті між поверхнями неметалічних матеріалів розміщують металічну фольгу товщиною 0,10...0,15 мм і нагрівають їх у ваку-

умі до певної температури під тиском біля 5 МПа. Пропускаючи через фольгу потужний струм, її переводять в стан пари, проводять ізотермічну витримку і охолоджують.

Незалежно від варіанта зварювання, важливе значення має сила зв'язку прошарку з основним матеріалом. При з'єднанні металів з неметалами залишкові власні напруження з'єднання визначаються різницею ТКЛР матеріалів і температурним інтервалом охолодження. Тому температура з'єднання повинна бути по можливості меншою.

До складу установки для зварювання входять вакуумна камера з вакуумною системою, високовольтний випрямляч з робочою напругою 10 кВ, генератор імпульсів, системи нагріву деталей, їх стиснення та контролю і регулювання параметрів (режиму напilenня покриття і зварювання). Обладнання забезпечує розрядний струм до 60 кА і частоту імпульсів до 450 на годину.

Державний стандарт України ДСТУ 3761.2–98 "Зварювання та споріднені процеси" (частина 2) передбачає також інші способи зварювання тиском, крім розглянутих вище. Вони відрізняються від розглянутих способів, головним чином, джерелом тепла.

*Пресове зварювання з нагріванням дугою, керовану магнітним полем (magnetically impelled arc pressure welding)*, було розроблено для зварювання встик труб [92].

*Суть процесу пресового зварювання з нагріванням дугою, керовану магнітним полем (ПЗМКД)*, полягає в тому, що електрична дуга під дією зовнішнього керуючого магнітного поля переміщується в зазорі між торцями зварюваних труб, нагріває їх і зварне з'єднання формується при стисненні та спільній пластичній деформації крайок.

Магнітне поле відносно осі дуги може бути поздовжнім або поперечним. Вплив поперечного магнітного поля на дугу використовується при одному з найбільш продуктивних процесів дугового зварювання труб малого діаметра (до 100 мм) з товщиною стінки до 6 мм [92]. Електрична дуга переміщується в зазорі між торцями зварюваних заготовок із лінійною швидкістю до 200 м/с і нагріває крайки. Процес ПЗМКД виконується на повітрі без застосування захисних газів.

Поперечне магнітне поле, накладаючись на власне поле дуги, викликає її відхилення в той або інший бік. Ефект переміщення дуги в поперечному магнітному полі використовується для її руху в зазорі між торцями заготовок. Застосовують три принципово різні схеми зварювання магнітокеруваною дугою на постійному струмі [75]. У першій схемі дуга горить між крайками зварюваних деталей замкнутої форми; у другій – між зварюваними деталями замкнутої форми і допоміжним електродом;

## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

у третій – між крайками деталей лінійної форми. Взаємодію електричного струму з магнітним полем при зварюванні кільцевих швів труб показано на рис. 2.59.

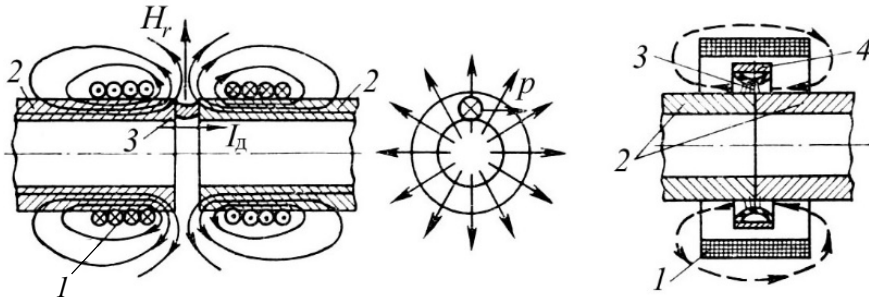


Рис. 2.59. Схеми зварювання труб магнітокерованою дугою між крайками зварюваних труб (а) та між зварюваними трубами і допоміжним кільцевим неплавким електродом (б)

Першу схему застосовують для зварювання кільцевих швів труб 2, на кінці яких надівають дві котушки 1, увімкнені зустрічно (див. рис. 2.59,а). Завдяки цьому в зазорі між трубами створюється радіальне магнітне поле напруженістю  $H_r$ . Якщо між торцями труб збуджується дуга 3, то на неї діє тангенціальна сила, обумовлена взаємодією струму дуги з магнітним полем:

$$P = kI_d H_r,$$

де  $k$  – коефіцієнт, що залежить від ряду факторів, у тому числі від розмірів зазору.

Напрямок руху визначається за правилом лівої руки, а швидкість руху обмежується швидкістю переміщення катодної плями. Після збудження дуги її швидкість руху досягає 1000...2000 об/хв по внутрішній поверхні труби. Через 3...5 с дуга зміщується по радіусу в зазор, швидкість обертання зменшується, можливі зупинки та короткі замикання зварювального ланцюга. Цей режим короткочасний. Після нього встановлюється стабільний режим із частотою обертання 15000...35000 об/хв. Після досягнення необхідної температури проводиться осадка труб.

Другу схему зварювання показано на рис. 2.59,б. Труби 2, додатковий неплавкий електрод 4 у вигляді мідного водоохолодного кільця і котушку електромагніта 1 розташовують співвісно. Електрична дуга 3 збуджується між допоміжним електродом 4 і крайками труб 2. Магнітне поле в зазорі між трубами і кільцем спрямоване аксіально. Взаємодія радіального струму дуги  $I_d$  з аксіальною складовою магнітного поля

### 2. 3. Інші способи зварювання тиском

напруженістю  $H_x$  створює зусилля  $P = kI_d H_x$ , що обертає дугу. Тонкостінні труби складають без зазору. Після нагрівання крайок проводять осадку труб.

Третя схема зварювання полягає в тому, що дуга рухається вздовж прямолінійних крайок і на їх кінцях відбуваються переключення полярності магнітного поля або електричного струму і дуга робить зворотнопоступальні рухи. Залежно від зварюваних матеріалів процес виконують із газовим захистом металу шва або без нього. Для збудження дуги можна застосовувати осцилятор, коротке замикання крайок тощо. За механізмом формування шва процес близький до контактного стикового зварювання оплавленням.

Найбільш поширена перша схема зварювання, коли електрична дуга збуджується між зварюваними крайками. *Важливими технологічними параметрами зварювання є сила зварювального струму, напруга дуги, зазор між крайками, напруженість магнітного поля, час зварювання.* Величина зазору визначає параметри дуги і звичайно дорівнює 1,5...2,8 мм.

Розроблена в ІЕЗ ім. Є.О. Патона технологія та обладнання (установки МД-102, МД-103, К-872) для ПЗМКД тонкостінних труб (до 6 мм) з вуглецевих і низьколегованих сталей знайшли широке застосування в різних галузях промисловості і будівництві.

Однією з умов стабільного і рівномірного нагрівання крайок є сумірність товщини труби та активних плям дуги. Тому в ІЕЗ для зварювання труб товщиною до 16 мм розроблено спосіб керування, який дозволяє постійно переміщувати дугу по всій площі поперечного перерізу торців труб шляхом створення оптимального розподілу індукції магнітного поля і зміщення дуги від внутрішньої до зовнішньої поверхонь труб [38].

Для видалення оксидних плівок зі стику крайки труб оплавляються, а частота обертання дуги забезпечує зберігання в стику розплавленого металу, який при стисненні видаляється. Стабільність формування якісних з'єднань забезпечується шляхом контролю і керування основними технологічними параметрами режиму безпосередньо в процесі ПЗМКД.

*Газопресове зварювання (gasschweissen; gas pressure welding; газопрессовая сварка)* – зварювання тиском, під час якого з'єднувані поверхні заготовок попередньо нагрівають теплом спалюваних газів.

*Пічне зварювання (feuerschweissen; pressure welding with furnace heating; печная сварка)* – зварювання тиском, під час якого нагрівання відбувається в печах або горнах.

*Індукційне зварювання (induction welding; индукционная сварка)* – зварювання тиском із нагріванням з'єднуваних поверхонь заготовок індуктивним у них електричним струмом. Цей спосіб поєднує зварювання струмами високої та промислової частот, які розглянуто в п. 1.5.

## 2. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ...

*Ковальське зварювання (hammerschweissen; forge welding, hammer welding; кузнечная сварка)* – зварювання тиском, у процесі якого попередньо нагріті заготовки з'єднують ударами молота чи іншими імпульсними зусиллями. Цей спосіб відомий з давніх часів, але сьогодні промислового значення він не має.

У науковій літературі зустрічаються також інші назви способів зварювання. Наприклад, у роботі [33] та інших вживаються терміни "мікрозварювання тиском", "ультразвукове мікрозварювання", "термокомпресійне зварювання" тощо. Під термокомпресією розуміють метод з'єднання металів із металами та неметалами з нагріванням при відносно низьких тисках (напруженнях). Як відзначається в роботі [33], більш правильною назвою цього способу є "мікрозварювання тиском", оскільки проблеми зварювання пов'язані з мініатюрністю деталей (інтегральні та гібридні інтегральні схеми, алюмінієві або золоті провідники діаметром 10...300 мкм, напилені плівки з цих же матеріалів, ковар, Si, SiO<sub>2</sub> тощо).

З подальшим розвитком техніки і технологій будуть з'являтися нові назви та способи зварювання тиском, але основні процеси при цих способах вписуються в узагальнену схему, розглянуту в розд. 1.

### Контрольні питання і завдання

1. Суть та параметри режиму дифузійного зварювання у вакуумі.
2. Роль процесів повзучості металу при ДЗВ.
3. Термічна активація поверхонь при ДЗВ.
4. Роль дифузійних процесів при ДЗВ однорідних металів.
5. Роль дифузійних процесів при ДЗВ різнорідних металів з обмеженою розчинністю.
6. Процеси рекристалізації при ДЗВ.
7. Дифузійне зварювання у вакуумі з проміжними прошарками, що знаходяться у твердому стані.
8. Дифузійне зварювання у вакуумі з проміжними прошарками, які розплавляються.
9. Суть процесу дифузійного зварювання у вакуумі з керованим напружено-деформованим станом.
10. Роль деформацій миттєвої пластичності та повзучості у формуванні напружено-деформованого стану та з'єднань різнорідних матеріалів.
11. Механічні вакуумні насоси, принцип їх роботи та основні характеристики.
12. Паромасляні дифузійні вакуумні насоси, принцип їх роботи та основні характеристики.

### *2. 3. Інші способи зварювання тиском*

---

---

13. Турбомолекулярні і сорбційні насоси, принцип їх роботи та основні характеристики.
  14. Обладнання для ДЗВ та його основні вузли і призначення.
  15. Зварювання прокатуванням і автовакуумне зварювання та їх застосування в промисловості.
  16. Технологія ДЗВ однорідних металів.
  17. Технологія ДЗВ різнорідних матеріалів з обмеженою розчинністю.
  18. Проблеми ДЗВ металів з керамікою.
  19. Застосування електричного вибуху провідника при ДЗВ.
  20. Використання енергії удару при зварюванні тиском та пресового зварювання з нагріванням дугою, керованою магнітним полем.
- 
-



### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ ВИСОКОЦЕНТРОВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ТЕПЛА

Зварювання плавленням є основним методом виготовлення конструкцій, а перше місце за обсягом використання займає електродугове зварювання. Разом із тим цей спосіб має певні недоліки, які не дозволяють забезпечити необхідну якість зварювання багатьох металів та сплавів, наприклад високолегованих, високоактивних, жароміцних тощо. У таких випадках застосовують способи зварювання з вакуумним захистом металу, високоцентрованими джерелами теплоти, до яких належать електронний промінь, лазерний промінь, плазма та гібридні технології. Порівняти різні способи зварювання за концентрацією та витратами енергії дає можливість рис. 3.1.

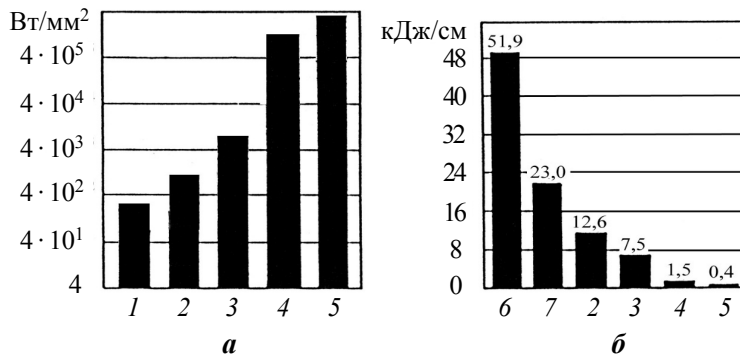


Рис. 3.1. Густина (а) та витрати (б) енергії на 1 см довжини шва при різних способах зварювання сталі товщиною 4 мм:

- 1 – електродугове неплавким електродом; 2 – електродугове плавким електродом;  
3 – плазмове; 4 – електронно-променеве; 5 – лазерне; 6 – ацетилено-кисневе;  
7 – електродугове покритим електродом

З рис. 3.1 видно, що за густиною та витратою енергії електродугові способи зварювання значно поступаються плазмовому, електронно-променевому та лазерному зварюванні, які розглядаються в цьому розділі.

### 3.1. Електронно-променеве зварювання

#### 3.1.1. Суть способу

Електронно-променеве зварювання (*elektronenstrahlschweissen; electron beam welding; електронно-лучевая сварка; ЕПЗ*) виконується з використанням для нагрівання і плавлення металу кінетичної енергії електронів, сфокусованих у промінь та прискорених електричним полем з високою різницею потенціалів. При бомбардуванні поверхні металу електрони гальмуються і їх кінетична енергія перетворюється в теплову. Для зварювання використовують гостросфокусований потік прискорених електронів, який називають *електронним променем*.

Електрон являє собою найменшу стійку заряджену елементарну частину матерії, яка легко утворюється у вільному стані і прискорюється електричним полем. Його негативний заряд  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл, маса  $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$  кг, радіус  $r_e = 2,82 \cdot 10^{-15}$  м, питомий заряд  $e/m_e = 1,759 \cdot 10^{11}$  Кл/кг.

Електрони отримують шляхом термоелектронної емісії з розжареного металевго катода, фокусують у промінь та керують променем за допомогою магнітних полів. Мінімальна площа плями нагрівання складає  $10^{-5}$  мм<sup>2</sup>. Пристрій, за допомогою якого отримують вузький електронний промінь із великою густиною енергії, називають *електронною гарматою* [56].

Схему формування електронного променя для зварювання показано на рис. 3.2 [58, 70].

Електронна гармата має катод 6, який нагрівається до високих температур і емітує електрони. Навколо катода розміщено прикатодний електрод 5. На деякій відстані від катода знаходиться анод 4 з отвором. Потік електронів попередньо формується електростатичним полем в області катод-анод, причому швидкість електронів є функцією різниці потенціалів між анодом і катодом. Прикатодний електрод 5 та анод 4 завдяки своїй формі фокусують електрони в пучок діаметром, який дорівнює діаметру отвору в аноді 4.

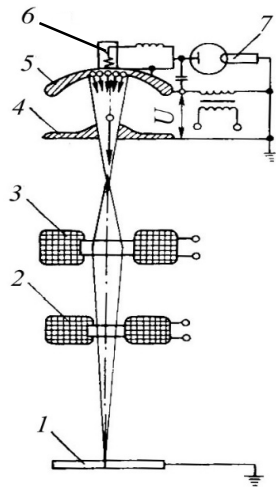


Рис. 3.2. Схема електронно-променевого зварювання

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

На шляху до анода електрони набувають значної швидкості та енергії, оскільки позитивний потенціал анода складає десятки кіловольт. Пройшовши анод, електрони зіштовхуються один з одним і частково змінюють свою траєкторію. Для збільшення густини енергії в промені за анодом устанолюється фокусуєча магнітна лінза 3. Керують променем за допомогою магнітного поля системи 2. Живлення електронної гармати здійснюється високовольтним джерелом 7 постійного струму. Для забезпечення вільного переміщення електронів від катода до виробу 1, захисту катода і металу шва зварювання зазвичай ведуть у вакуумі порядку  $1,33 \cdot 10^{-2}$  Па.

Густина струму термоелектронної емісії  $j_e$  визначається рівнянням Річардсона–Дешмана

$$j_e = AT^2 \exp\left(-\frac{\Phi}{kT}\right) \text{ А/см}^2, \quad (3.1)$$

де  $A$  – емісійна постійна, яка дорівнює для більшості металів  $60 \dots 70 \text{ А/см}^2 \cdot \text{К}^2$ ;  $T$  – абсолютна температура катода;  $\Phi$  – робота виходу електронів, Дж;  $k$  – стала Больцмана, яка дорівнює  $1,37 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ .

З рівняння (3.1) видно, що значно впливає на струм електронної емісії температура катода. Оскільки електрони мають малу масу, то в електричному полі вони отримують великі прискорення. Якщо електрон помістити в однорідне електричне поле напруженістю  $E$ , то на нього буде діяти сила  $F = -eE$ , де  $e$  – заряд електрона. Робота переміщення електрона з однієї точки в іншу дорівнює добутку величини заряду електрона на різницю потенціалів  $U, B$ , між точками:  $A = eU$ . Ця робота переходить у кінетичну енергію електрона, що дорівнює  $1/2 m(v - v_0)^2$ , де  $m$  – маса електрона;  $v_0$  – початкова швидкість;  $v$  – кінцева швидкість.

Прийнявши початкову швидкість рівною нулю, з рівності роботи й енергії знайдемо швидкість електрона залежно від потенціалу електричного поля:

$$v = \sqrt{\frac{2e}{m}U}. \quad (3.2)$$

Підставивши в рівняння (3.2) значення заряду і маси електрона, одержимо наближене рівняння для розрахунку швидкості руху електрона:

$$v \approx 600\sqrt{U} \text{ км/с}. \quad (3.2a)$$

Швидкість електронів при різниці потенціалів 10 кВ досягає 60000 км/с. Змінюючи величину і напрямок початкової швидкості електрона, вели-

### 3. 1. Електронно-променеє зварювання

чину і напрямку напруженості електричного поля, а також діючи магнітним полем, можна змусити електрон рухатися по заздалегідь заданій траєкторії.

Сила  $F$ , що діє в магнітному полі на провідник довжиною  $l$  зі струмом  $I$ , який розміщений під кутом  $\alpha$  до напрямку вектора магнітної індукції  $B$ , визначається за законом електромагнітних сил Ампера:  $F = BIl \sin \alpha$ . За аналогією визначається сила, яка діє на електрон, що рухається в магнітному полі:

$$F = Bv \sin \alpha,$$

де  $\alpha$  – кут між напрямками руху електрона та струму і магнітних силових ліній.

При русі електрона вздовж поля  $F = 0$ , а перпендикулярно до вектора магнітної індукції сила максимальна:  $F = Bv$ . Напрямок цієї сили визначається за правилом лівої руки з урахуванням прийнятого в техніці напрямку струму. Сила  $F$  завжди перпендикулярна до напрямку магнітних силових ліній та напрямку миттєвої швидкості електрона  $v$ . Під її дією, відповідно до закону Ньютона, електрон отримує прискорення, яке дорівнює  $Bv/m$ , і буде рухатися по колу в площині, перпендикулярній до силових ліній магнітного поля (рис. 3.3, *a*). На рис. 3.3, *b* показано рух електрона в магнітному полі, якщо його початкова швидкість  $v$  і магнітні силові лінії знаходяться під кутом  $\alpha$ . У цьому випадку траєкторію електрона визначають дві складові швидкості: нормальна  $v_1$  і дотична  $v_2$ . Під дією першої складової електрон рухається по колу, під дією другої – вздовж силових ліній  $B$ . У результаті траєкторія електрона набуває вигляду спіралі. Зміну траєкторії електронів у магнітному полі використовують для фокусування і керування потоком електронів за допомогою фокуруючої магнітної лінзи 3 і відхиляючої магнітної системи 2 електронних гармат (див. рис. 3.2).

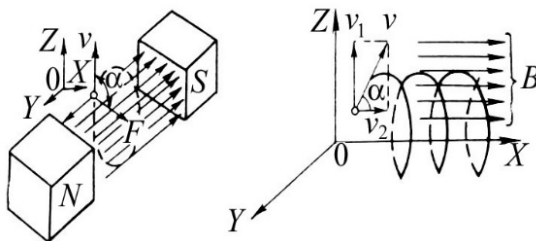


Рис. 3.3. Траєкторія електрона в магнітному полі:

*a* – перпендикулярно до силових ліній; *b* – під кутом  $\alpha$  до силових ліній

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

При бомбардуванні анода  $N$  електронами потужність, що виділяється у вигляді теплоти, дорівнює

$$P = NeU = IU, \quad (3.3)$$

де  $I$  – сила струму променя (анодний струм);  $U$  – прискорююча напруга.

На відміну від багатьох широко застосовуваних джерел теплоти, які забезпечують нагрівання металу шляхом теплопередачі через його поверхню, при електронно-променевому нагріванні виділення теплової енергії відбувається в самому металі на деякій глибині. Це обумовлено проникненням у метал прискорених електронів і їх гальмуванням у приповерхневому шарі. Товщина поверхневого шару речовини, в якому відбувається повна втрата енергії електрона в результаті численних зіткнень з іонами й електронами речовини, визначає його пробіг. Згідно з даними Б. Шенланда, пробіг електронів порівняно невеликих енергій визначається за рівнянням

$$\delta = 2,1 \cdot 10^{-12} \frac{U^2}{\rho} \text{ см}, \quad (3.4)$$

де  $\rho$  – густина речовини, г/см<sup>3</sup>.

Розрахунки показують, що глибина проникнення електронів у метал при зварюванні досягає декількох десятків мікрометрів. Хоча ця величина невелика, але її врахування дозволяє пояснити основні закономірності електронно-променевого зварювання, особливо при великих значеннях питомої потужності в електронному промені.

Гальмування електронів у поверхневому шарі матеріалів забезпечує високий коефіцієнт використання їх енергії (90 %) [56]. Електронне бомбардування речовини супроводжується рентгенівським та тепловим випромінюванням, відбиттям електронів та виходом вторинних електронів, а також випаровуванням металу.

#### 3.1.2. Технологія зварювання

Основними параметрами процесу електронно-променевого зварювання є сила струму електронного променя  $I$ , прискорююча напруга  $U$ , швидкість зварювання  $v_{зв}$ , сила струму магнітної фокусуєчої лінзи  $I_{\phi}$ , що визначає положення фокуса променя відносно поверхні та діаметр плями нагрівання виробу, вакуум, а також робоча відстань електронної гармати від деталі. Саме ці параметри контролюються в промисловому обладнанні для ЕПЗ.

### 3. 1. Електронно-променеве зварювання

Велика потужність і локальність нагрівання дозволяють використовувати промінь для зварювання будь-яких металів значних товщин. Густина енергії в плямі нагрівання може досягати  $5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Потужність та густина енергії електронного променя для зварювання повинні мати свій оптимум, тому що при занадто високій густині енергії можливі не лише плавлення металу, але і швидке випаровування, внаслідок чого відбувається різання металу.

Питома потужність електронного променя відіграє істотну роль у характері проплавлення металу. При використанні низьковольтних гармат і струмів променя силою до 35 мА форма проплавлення металу близька до форми проплавлення при аргонодуговому зварюванні. Збільшення сили струму призводить до виникнення клиноподібної ділянки в нижній частині зварювальної ванни. Найбільший вплив на форму проплавлення має прискорююча напруга. Зі збільшенням напруги до 70 кВ різко збільшується глибина проплавлення. Зона проплавлення набуває форму конуса, а відношення її ширини до глибини дорівнює 0,10...0,07. Вплив фокусування променя на проплавлення металу показано на рис. 3.4, *а-в*, а макрошліф з'єднання – на рис. 3.4, *г*.

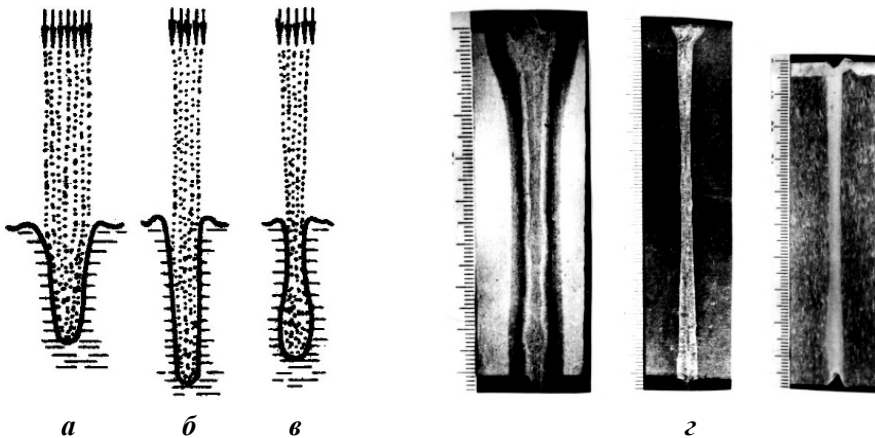


Рис. 3.4. Конфігурація потоку електронів при бомбардуванні виробу (*а-в*) і форма проплавлення при зварюванні (*г*):

*а* – недофокусування; *б* – оптимальне фокусування;  
*в* – перефокусування; *г* – макрошліфи зварних з'єднань

При невеликих значеннях питомої потужності ЕПЗ використовують для металу товщиною 2...3 мм. У цьому випадку процес подібний до електродугового зварювання і характеризується лише значним газовиділенням зі зварювальної ванни під впливом вакууму.

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

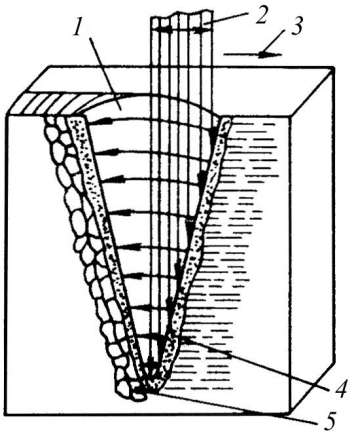


Рис. 3.5. Схема руху розплавленого металу при ЕПЗ:

- 1 – розплавлений метал;
- 2 – електронний промінь;
- 3 – напрям зварювання;
- 4, 5 – передня та задня стінки кратера відповідно

Зварювання товстолистового металу проводиться при великій густині енергії в промені, що забезпечує глибоке проплавлення. На початковій стадії проплавлення металу нерухомих променем утворюється конусоподібне поглиблення. Утворення конуса проплавлення пояснюється тим, що в початковий момент вся енергія зосереджується в поверхневому шарі, товщина якого дорівнює глибині проникнення електронів у метал. При цьому площа плями нагрівання дорівнює площі перерізу падаючого променя, а густина енергії максимальна. Розплавлений метал інтенсивно виноситься із зони нагрівання й утворюється поглиблення (канал) у вигляді конуса, бокова поверхня якого (за площею) значно більша від основи конуса. Унаслідок цього густина енергії променя на боковій поверхні конуса зменшується і кратер росте до певних розмірів. На стінках кратера

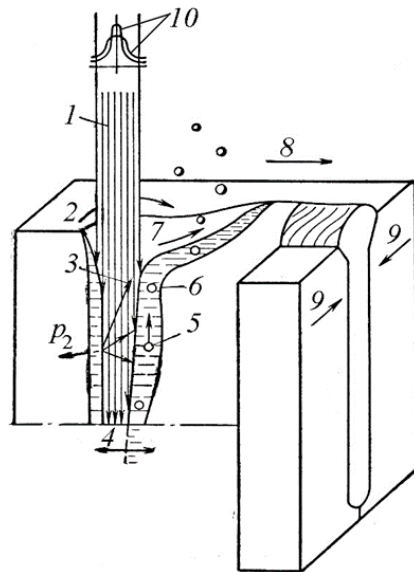
товщина шару розплавленого металу не перевищує 0,15 мм. При русі променя метал плавиться на передній стінці кратера. Потім розплавлений метал переміщується до задньої стінки, де він кристалізується (рис. 3.5). Перенос металу в зону кристалізації відбувається по стінках кратера. Переміщення металу пояснюється дією сил, обумовлених нерівномірним розподілом температури в кратері, оскільки дії тиску потоку електронів, електромагнітної сили від струму променя, сил реакції парів або статичного тиску парів металу в кратері, поверхневого натягу рідкого металу, тяжіння або статичного тиску металу не можуть суттєво впливати на переміщення металу у зв'язку з малою величиною або напрямом дії [56, 70, 87].

При напрямку зварювання 3 на передній стінці кратера 4 температура поверхневого шару може досягати температури кипіння, а на задній стінці кратера 5 метал кристалізується. Чим вищою є температура, тим меншою є сила поверхневого натягу. Тому при наявності градієнта температур на поверхні рідкого металу з'являється додаткове термокапілярне напруження, яке діє тангенціально до поверхні. Його величина визначається градієнтом поверхневого натягу. Вона прагне привести поверхню рідини в рух у напрямку від високих до нижчих температур, тобто у бік зменшення температури. Додатковою причиною руху розплавленого металу є кривизна поверхні кратера.

### 3. 1. Електронно-променеє зварювання

У реальних умовах ЕПЗ існують також інші напрямки переміщення розплавленого металу, причому слід враховувати, що ЕПЗ може виконуватися як вертикальним променем у нижньому положенні, так і горизонтальним променем. Переміщення металу в кратері залежить від параметрів режиму зварювання. Швидкісною кінозйомкою встановлено наявність пульсації кратера у зварювальній ванні. У системі концентрований електронний промінь—розплавлений метал при певному значенні постійного в часі потоку енергії виникають автоколивання, в основному, за рахунок екранування променя парами металу. Схему формування шва при ЕПЗ металів великої товщини показано на рис. 3.6.

Рис. 3.6. Схема процесу ЕПЗ металу великої товщини:  
1 – електронний промінь; 2 – переміщення металу із зони плавлення в зону кристалізації;  
3 – напрямки випаровування металу;  
4 – коливання поверхні кратера в зоні кристалізації; 5 – газові бульбашки;  
6 – фронт кристалізації; 7 – винос металу до верхньої частини зварювальної ванни;  
8 – рух виробу; 9 – поперечна усадка шва;  
10 – розподіл густини струму у сфокусованому та розфокусованому електронних променях



У верхній частині зварювальної ванни розплавлений метал піднімається над поверхнею зварюваного виробу, що при його кристалізації призводить до утворення характерного підсилення металу шва. Чітко встановлено періодичність переміщень металу із зони плавлення в зону кристалізації. При ЕПЗ заглибленим променем спостерігається пульсація кратера зварювальної ванни, а відповідно – теплопідводу і глибини проплавлення. Коливання глибини проплавлення можуть бути зведені до мінімуму, якщо забезпечити стабільність погонної енергії, конфігурації потоку електронів до виробу, розподілу густини електронів по перерізу променя та вакууму в робочій камері. При зварюванні заглибленим променем рекомендується зменшувати питому потужність променя у кратері шляхом його фокусування таким чином, щоб фокус знаходився вище глибини проплавлення.



### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

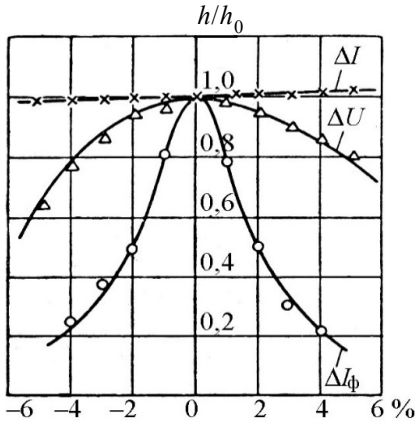


Рис. 3.7. Зміна глибини проплавлення  $h$  відносно товщини листа  $h_0$  при зміні сили струму променя  $\Delta I$  (%), прискорюючої напруги  $\Delta U$  та сили струму магнітної лінзи  $\Delta I_\phi$

Важливість стабільності параметрів режиму ЕПЗ для формування шва показано на рис. 3.7, з якого видно, що **найбільший вплив на глибину проплавлення має сила струму у фокусуєчій системі**. Тому її відхилення не повинне перевищувати 0,01...0,1 %, відхилення прискорюючого напруження – 1...2 %, а сили струму в промені – 3...5 %. Графіки побудовано для низьковольтної зварювальної гармати У-146 з великим кутом сходження [56, 87].

Для зварювальних гармат з малим кутом сходження вимоги менш жорсткі, але стабільність параметрів систем живлення зварювальних гармат є надзвичайно важливою.

Характер гідродинамічних явищ у зварювальній ванні залежить від її форми та розмірів [56, 87]. Оскільки він має вирішальне значення для якості формування зварного шва, то розроблено досить багато *технологічних варіантів керування поведінкою розплавленого металу*: зварювання вертикальним променем у нижньому положенні, зварювання горизонтальним променем вертикальних та горизонтальних швів, зварювання розгорнутим променем при різних траєкторіях та швидкостях локального руху променя відносно зварюваного стику при загальному переміщенні вздовж стику, зварювання з імпульсною модуляцією струму променя тощо. Застосування різних технологічних прийомів дозволяє виконувати ЕПЗ металів великих товщин.

При ЕПЗ вертикальним променем у нижньому положенні глибина проплавлення при досягненні певної величини коливається внаслідок гідродинамічних процесів у розплавленому металі, що призводить до утворення несплавлень, раковин та інших дефектів. Це пов'язано з тим, що в плямі дії електронного променя поверхня розплаву деформується під дією реактивного тиску парів та основна частина розплаву витісняється в хвостову частину ванни, як показано на рис. 3.6, а невелика частина витісняється і рухається перед променем. Поступово перед променем кількість металу накопичується до певної критичної маси, а потім він відстає від променя і переходить у хвостову частину ванни, що змінює форму каналу, порушує його стабільність, супроводжується розбризку-

### 3. 1. Електронно-променеве зварювання

---

ванням та виплесками металу зі зварювальної ванни. При зварюванні розгорнутим променем і певній швидкості його локального руху спостерігається локальний рух розплавленого металу, стабілізація форми каналу та процесу зварювання в цілому. Для підвищення ефективності цього прийому рекомендується використовувати розгортку променя з його подвійним заломленням, що забезпечує паралельний перенос променя [87].

**Для з'єднання металів великої товщини (більше 80 мм) використовують ЕПЗ горизонтальним електронним променем** з вертикальним переміщенням гармати або деталі, що дає можливість зварювати товщини до 200 мм з повним проплавленням із застосуванням формуючих пристроїв. Головною особливістю способу є те, що він дозволяє зменшити інтенсивність взаємодії променя з ванною металу. При правильному виборі положення фокуса, параметрів променя та його кута нахилу до горизонталі товщини до 100 мм можна зварювати без формуючих пристроїв. Рекомендується положення фокальної площини на відстані  $1/3$  товщини від поверхні.

При зварюванні товщин більше 80 мм горизонтальним променем у горизонтальній площині найбільші складнощі викликає періодичне випліскування металу, пов'язане зі збільшенням об'єму металу при плавленні і його накопиченні у вигляді краплі у хвостовій частині зварювальної ванни. Для попередження випліскування рекомендується застосовувати повне проплавлення, електронний промінь із найменшими можливими діаметром і кутом сходження, розгортку променя з подвійним заломленням, можливу меншу швидкість зварювання, розміщувати фокус променя в зоні проплавлення. Перелічені заходи сприяють формуванню стабільного капілярного каналу в зварювальній ванні з оптимальним об'ємом розплавленого металу.

Електронно-променеве зварювання дозволяє отримувати вузькі шви "ножової" форми, в яких глибина проплавлення перевищує ширину більше ніж у 10 разів. Імпульсна модуляція струму променя дозволяє це співвідношення значно збільшити.

Доцільно використовувати частоту імпульсної дії променя, що дорівнює власній частоті коливань зварювальної ванни. Для цього попередньо розраховують частоту коливань зварювальної ванни. Розрахунки та експериментальні дослідження показали, що діапазон частот коливань розплавленого металу знаходиться в інтервалі від десятків до сотень герц. Наприклад, рекомендується частота розгортки променя біля 130 Гц у формі поздовжніх коливань з розміром розгортки 3 мм. Промінь імпульсно перекидається в напрямку хвостової частини ванни, а потім майже

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯ...

весь період рухається за напрямком зварювання. Форму зміни сили струму в котушці відхилення променя показано на рис. 3.8.

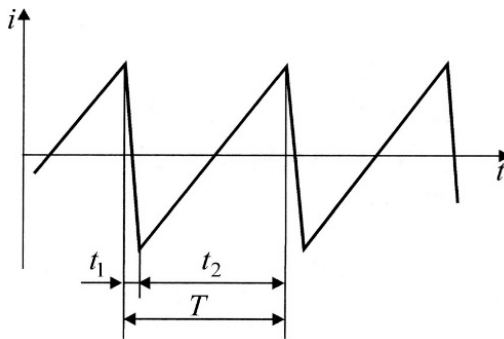


Рис. 3.8. Форма зміни сили струму  $I$  в котушці відхилення променя:  
 $T$  – період розгортки;  $t_1$  – час переносу променя у хвостову частину ванни;  
 $t_2$  – час руху променя від хвостової частини в напрямку зварювання;  
 $t$  – поточний час

При розгортці променя з поздовжніми коливаннями, на відміну від зварювання з поперечними коливаннями або круговою розгорткою, отримують вузькі шви, причому із заокругленням кореня шва при неповному проплавленні.

Макрошліфи сталі 12Х2Н4МД товщиною 57 мм при наскрізному та неповному проплавленні показано на рис. 3.9.

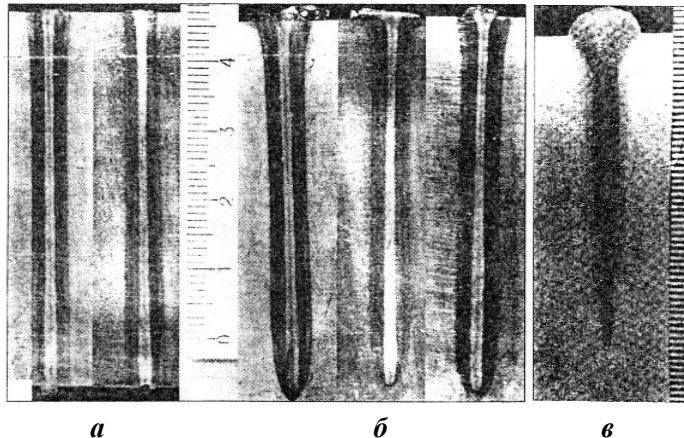


Рис. 3.9. Наскрізне (а) і неповне (б) проплавлення сталі 12Х2Н4МД з поздовжніми коливаннями променя та макрошліф сталі 10Х18Н9Т при однопрохідному ЕПЗ без імпульсної дії (в)

При наскрізному (див. рис. 3.9,а) проплавленні ( $U = 60$  кВ;  $I = 235$  мА;  $v_{зв} = 18$  м/год) отримали  $h/B_{сер} = 42$  ( $h$  – глибина проплавлення;  $B_{сер} = 1,35$  мм – середня ширина шва). При неповному (див. рис. 3.9,б) проплавленні отримали  $h/B_{сер} = 38$ ,  $B_{сер} = 1,42$  мм ( $I = 215$  мА,

### 3. 1. Електронно-променеве зварювання

решта параметрів однакові з попереднім випадком). В обох випадках виконували поздовжні коливання променя із частотою  $f = 130$  Гц та розміром розгортки 3 мм. Для порівняння на рис. 3.9, в показано макрошліф з типовим ЕПЗ при  $U = 60$  кВ,  $I = 170$  мА,  $v_{зв} = 10$  м/год,  $h/B_{сер} = 16$ ,  $B_{сер} = 3,1$  мм. При імпульсній дії променя проплавлення є більш глибоким, вузьким та рівномірним по глибині внаслідок витіснення металу у хвостовій частині ванни та утворення парогазового каналу, по якому проникає промінь при його поверненні. Відповідно зростає глибина зварювальної ванни та зменшується її ширина, але об'єм металу ванни залишається той же.

Дослідження впливу модуляції струму на формування зварного шва при зварюванні сталі 12Х18Н10Т товщиною 10 мм із частотою 230...630 Гц показали, що при найбільшій глибині проплавлення частота модуляції струму променя залежить від положення фокальної площини променя відносно поверхні металу. Модуляція струму в оптимальному діапазоні частот дозволяє збільшити глибину проплавлення на 20...25 % при одній і тій же потужності променя.

У ряді випадків виникає необхідність легування металу шва, наприклад, для компенсації втрачених елементів за рахунок випаровування, забезпечення стійкості металу проти гарячих тріщин тощо. У таких випадках використовують присадні матеріали у вигляді прокладок, вставок тощо. Розроблено ЕПЗ із автоматичною подачею в зону зварювання подрібненого присадного дроту.

Для покращення якості металу шва застосовують також попередні проходи променем для очищення і виділення газів з поверхні, зварювання з вузьким зазором, відхилення променя на 5...7° від вертикалі для зменшення кількості пор.

Для розрахунку параметрів режиму ЕПЗ розроблено декілька методик. Наприклад, у роботі [17] рекомендовано визначати режими за тепловою ефективністю. Теплова ефективність проплавлення металу при зварюванні визначається повним тепловим коефіцієнтом корисної дії (ККД проплавлення  $\eta_{пр}$ ), тобто добутком ефективного  $\eta_{еф}$  та термічного ККД  $\eta_{т}$ . Нагадаємо, що *ефективний* ККД – це відношення кількості теплової енергії, уведеної в метал, до кількості енергії, виділеної її джерелом, або відношення потужності  $q_{еф}$  теплового джерела, діючого в металі, до потужності  $P$  електронного променя:

$$\eta_{еф} = \frac{q_{еф}}{P}. \quad (3.5)$$

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

Ефективність використання введеної в метал енергії характеризується термічним ККД, який визначається як відношення кількості теплоти, необхідної для проплавлення металу, до всієї теплоти, уведеної в метал виробу:

$$\eta_T = \frac{F_{\text{пр}} \nu_{\text{зв}} H_{\text{пл}}}{q_{\text{еф}}}, \quad (3.6)$$

де  $F_{\text{пр}} \nu_{\text{зв}} H_{\text{пл}}$  – умовний тепловміст проплавленого за одиницю часу основного металу;  $F_{\text{пр}}$  – площа проплавлення;  $\nu_{\text{зв}}$  – швидкість зварювання;  $H_{\text{пл}}$  – питомий об'ємний тепловміст розплавленого металу, що містить приховану теплоту плавлення.

Повний ККД

$$\eta_{\text{пр}} = \eta_{\text{еф}} \eta_T. \quad (3.7)$$

Для ЕПЗ з глибоким проплавленням ефективний ККД практично дорівнює одиниці, тому теплова ефективність фактично залежить лише від термічного ККД. Термічний ККД залежить від режиму зварювання, геометрії шва, теплофізичних властивостей матеріалу. У зв'язку зі складністю процесів передачі теплоти в каналі проплавлення розрахунок термічного ККД, залежно від виду апроксимації променя як джерела теплоти, дає значні розбіжності. Тому експериментально встановлено, що при ЕПЗ максимальне значення термічного ККД  $\eta_T$  для сталей складає близько 0,48 (при  $q_{\text{еф}}/h = 4,0 \dots 4,5$  кВт/см та  $q_{\text{еф}}/(h\nu_{\text{зв}}) = 5,5 \dots 6,5$  кДж/см<sup>2</sup>, де  $q_{\text{еф}}$  – ефективна потужність променя;  $h$  – глибина проплавлення); для титанового сплаву  $\eta_T = 0,6$  (при  $q_{\text{еф}}/h = 2$  кВт/см,  $q_{\text{еф}}/(h\nu_{\text{зв}}) = 7,3$  кДж/см<sup>2</sup>); для алюмінієвого сплаву  $\eta_T = 0,17 \dots 0,25$  ( $q_{\text{еф}}/h = 4 \dots 6$  кВт/см,  $q_{\text{еф}}/(h\nu_{\text{зв}}) = 5 \dots 6$  кДж/см<sup>2</sup>) [17]. Залежність термічного ККД ЕПЗ від параметра  $q_{\text{еф}}/h$  для сталей наведено на рис. 3.10.

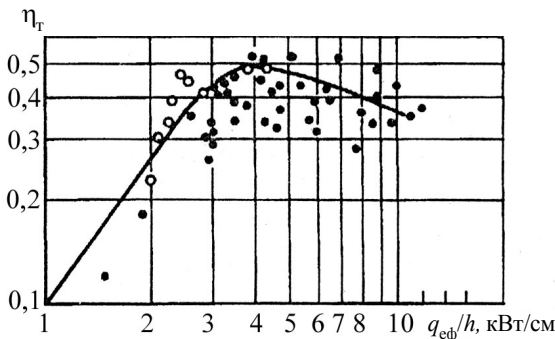


Рис. 3.10. Залежність термічного ККД ЕПЗ від параметра  $q_{\text{еф}}/h$  для сталей аустенітного (•) та перлітного (◦) класів

### 3. 1. Електронно-променеє зварювання

Аналогічний вигляд має залежність  $\eta_T = f(q_{\text{еф}}/h)$  для сплавів алюмінію та титану. Значення  $\eta_{T \text{ max}}$  для цих матеріалів при відповідних параметрах  $q_{\text{еф}}/h$  та  $q_{\text{еф}}/(hv_{\text{зв}})$  наведено в табл. 3.1 [17]. Оскільки  $\eta_T$  визначали експериментально з можливою похибкою, то для титану можна брати  $\eta_{T \text{ max}}$  рівним теоретичному 0,484.

**Таблиця 3.1. Максимальні значення термічних ККД та відповідні їм параметри  $q_{\text{еф}}/h$  і  $q_{\text{еф}}/(hv_{\text{зв}})$  для сплавів алюмінію, титану і корозійностійкої сталі**

Параметри	Сплави		Корозійностійка сталь
	алюмінію	титану	
$q_{\text{еф}}/h$ , кВт/см	4,2	2,0	4,3
$q_{\text{еф}}/(hv_{\text{зв}})$ , кДж/см <sup>2</sup>	5,35	7,3	5,5
$\eta_{T \text{ max}}$	0,165	0,62	0,41

Виходячи з максимального термічного ККД (див. табл. 3.1), для необхідної глибини проплавлення  $h$  знаходять потужність променя  $q_{\text{еф}}$  зі співвідношення

$$\frac{q_{\text{еф}}}{h} = \text{const.} \quad (3.8)$$

Оскільки ефективний ККД близький до одиниці, то  $q_{\text{еф}} = q$ . Прискорююча напруга визначається типом електронної гармати. Широко застосовують електронні гармати УЛ-141 (60 кВ, 60 кВт). Знаючи ефективну теплову потужність  $q_{\text{еф}}$  та прискорюючу напругу  $U$ , знаходять силу струму променя  $I$ .

Швидкість зварювання  $v_{\text{зв}}$ , см/с, визначають зі співвідношення

$$\frac{q_{\text{еф}}}{hv_{\text{зв}}} = \text{const.} \quad (3.9)$$

Діаметр променя  $d$  визначається за рівнянням [33]

$$d = \frac{4q_{\text{еф}}}{\pi hv_{\text{зв}} H_{\text{кип}}}, \quad (3.10)$$

де  $H_{\text{кип}}$  – тепловміст металу, що кипить.

Ширину шва  $B$  (ширину прямокутника висотою  $h$ , площа якого дорівнює площі поперечного перерізу шва  $F_{\text{пр}}$ ) визначають за такими рівняннями: при зварюванні в безперервному режимі

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

$$B = \left( \frac{4dq_{\text{еф}}}{\pi H_{\text{пл}} h} \eta_{\text{T}} \right)^{1/2}; \quad (3.11)$$

при зварюванні в імпульсному режимі

$$B = \left( \frac{4tq_{\text{еф}}}{\pi H_{\text{пл}} h_{\text{T}}} \eta_{\text{T}} \right)^{1/2}, \quad (3.11a)$$

де  $H_{\text{пл}}$  – тепловміст розплавленого металу;  $t$  – тривалість імпульсу.

Методику розрахунку рекомендовано для сплавів алюмінію товщиною  $\delta < 28$  мм, титанових сплавів  $\delta < 108$  мм, корозійностійкої сталі  $\delta < 25$  мм.

Наприклад, розглянемо розрахунки параметрів режиму зварювання сплавів алюмінію, титану та корозійностійкої сталі з глибиною проплавлення відповідно 2, 5 та 3 см. Користуючись даними табл. 3.1 та рівняннями (3.5)–(3.9), знайдемо параметри режимів та шва. Результати наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2. Параметри режимів ЕПЗ та зварних швів

Схема зварювання	Параметри	Сплави		Корозійностійка сталь
		алюмінію	титану	
	$h$ , см	2	5	3
	$q$ , кВт	8,4	10,0	12,9
	$U$ , кВ	60	60	60
	$I$ , А	0,14	0,17	0,21
	$v_{\text{зв}}$ , см/с	0,78	0,28	0,78
	$d$ , см	0,20	0,19	0,12
	$B$ , см	0,29	0,42	0,20

Якщо зварювання виконується променем з рівномірною круговою розгорткою, то при відомій оптимальній швидкості переміщення променя  $v_{\text{зв}}$  для даного матеріалу і глибини проплавлення  $h$  частота  $f$  та діаметр  $D$  кругової розгортки (діаметр кола, яке описує центр електронного променя на поверхні зварюваних деталей) пов'язані співвідношенням

$$v_{\text{зв}} = \pi f D. \quad (3.12)$$

Слід відзначити, що максимальна глибина проплавлення не завжди оптимальна за тепловою ефективністю. Наприклад, при ЕПЗ сталі 12Х18Н10Т максимальному значенню термічного ККД  $\eta_{\text{T}} = 0,41$  відповідають глибина проплавлення  $h = 11$  мм та найбільш сприятлива за механічними властивостями і мікроструктурою мінімальна глибина зони

### 3. 1. Електронно-променеве зварювання

термічного впливу ( $h_{зТВ} = 0,2$  мм), але при  $\eta_T = 0,37$  маємо  $h = 16$  мм і  $h_{зТВ} = 0,3$  мм, а при  $\eta_T = 0,26$  маємо  $h = 25$  мм і  $h_{зТВ} = 1,6$  мм [17].

Для зварювання гартованих сталей доцільно спочатку визначити за діаграмою термокінетичного розпаду аустеніту або розрахунком оптимальну для даного матеріалу швидкість охолодження, а потім знаходити параметри режиму ЕПЗ. Наприклад, у роботі [79] для цього розв'язували рівняння термічного циклу зварювання відносно середньої швидкості охолодження з урахуванням рівняння теплового балансу за час переміщення електронного променя в напрямку зварювання на відстань, що дорівнює діаметру електронної плями на виробі. Автори роботи припустили, що шов має постійну ширину по глибині, яка не змінюється із часом, втрати енергії на випаровування та на розсіювання електронів відсутні, а розплав знаходиться при температурі плавлення.

Термічний цикл зварювання визначають за відомим рівнянням Н.Н. Рикаліна [68]:

$$\frac{dT(0,t)}{dt} = 2\pi\lambda c\rho [T(0,t) - T_0]^3 \left( \frac{v_{зВ} h}{IU} \right)^2, \quad (3.13)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;  $c$  – питома теплоємність;  $T_0$  – початкова температура.

Тепловий баланс у зоні зварювання

$$E_1 = E_2 + E_3, \quad (3.14)$$

де  $E_1$  – енергія, яка підводиться електронним променем за час переміщення на один діаметр електронної плями;  $E_2$  – енергія, яка витрачається на нагрівання і плавлення металу шва;  $E_3$  – енергія, яка витрачається на тепловідвід з бокових стінок шва, що пропорційна градієнту температур.

Енергія, що підводиться електронним променем,

$$E_1 = IU \frac{d}{v_{зВ}}, \quad (3.15)$$

де  $d = d_{п} + d_{р}$  – діаметр елементарної плями на виробі ( $d_{п}$  – діаметр променя;  $d_{р}$  – діаметр розгортки).

Енергія, що витрачається на нагрівання та плавлення металу шва,

$$E_2 = 2hd^2\rho [c(T_{пл} - T_0) + L], \quad (3.16)$$

де  $T_{пл}$  – температура плавлення;  $L$  – питома теплота плавлення.

Енергія, що відводиться з бокових стінок шва, знаходиться за рівнянням:

$$E_3 = 2hd^2 \frac{\lambda}{v_{зВ}} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (3.17)$$



### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

де  $\frac{\partial T}{\partial t}$  – градієнт температур на границі плавлення.

У роботі [17] отримано наближене значення  $E_3$ :

$$E_3 = 2hd^2 \frac{\lambda}{v_{зв}} \left( \frac{1}{d} + c\rho \frac{v_{зв}}{2\lambda} \right) (T_{пл} - T_0). \quad (3.18)$$

Тепловий потік у напрямку, протилежному напрямку зварювання, не враховували, а тепловий потік у напрямку зварювання від передньої стінки каналу зварювальної ванни враховували в  $E_2$  (підігрів нових ділянок шва).

З урахуванням (3.15), (3.16), (3.18) знайдемо потужність променя:

$$UI = dv_{зв}\rho h [2c(T_{пл} - T_0) + L] + 2\lambda h (T_{пл} - T_0). \quad (3.19)$$

Розв'язуючи рівняння (3.13) з урахуванням (3.19), отримаємо рівняння середньої швидкості охолодження  $\omega$  у заданому температурному інтервалі для осі шва:

$$\omega = \frac{T_1 - T_2}{t} = \frac{4\pi\lambda c\rho(T_1 - T_0)^2(T_2 - T_0)^2}{\left( d\rho[2c(T_{пл} - T_0) + L] + \frac{2\lambda}{v_{зв}}(T_{пл} - T_0) \right)^2 (T_1 + T_2 - 2T_0)}, \quad (3.20)$$

де  $t$  – час, протягом якого температура шва зменшується від  $T_1$  до  $T_2$ .

Вплив параметрів режиму ЕПЗ сталі 18Х11МНФБ (ЭП291) показано на рис. 3.11 [79].

Швидкість охолодження в заданому інтервалі температур залежно від швидкості зварювання  $v_{зв}$  знаходять за рівнянням (3.20), ураховуючи діаметр електронної плями при зварюванні розгорнутим променем, умови якісного формування шва при заданій товщині металу, забезпечення стійкості проти гарячих тріщин та інші фактори, або за рівнянням (3.10).

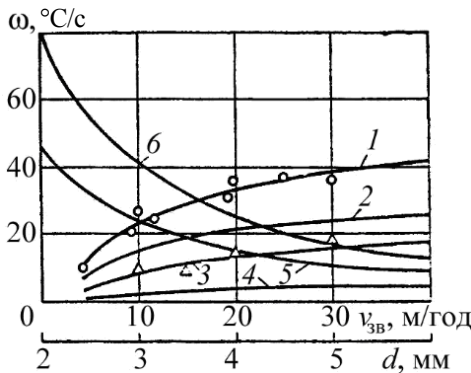


Рис. 3.11. Залежність швидкості охолодження в температурному інтервалі  $600 \dots 500^{\circ}\text{C}$  сталі ЭП291 від швидкості зварювання  $v_{зв}$  ( $1 - T_0 = 20^{\circ}\text{C}$ ;  $2 - 120^{\circ}\text{C}$ ;  $3 - 180^{\circ}\text{C}$ ;  $4 - 350^{\circ}\text{C}$ ) та від діаметра електронної плями  $d$  ( $5 - v_{зв} = 12$  м/год;  $6 - 36$  м/год);  $\circ$  – експериментальні значення при  $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$ ;  $\Delta$  – при  $180^{\circ}\text{C}$

### 3. 1. Електронно-променеє зварювання

Для визначення оптимальної для даного матеріалу швидкості охолодження можна змінювати також інші параметри.

Фізичні константи сталі ЭП291 для розрахунку були прийняті такими:  $c = 690$  Дж/(кг·°С);  $\lambda = 26,8$  Вт/(м·°С);  $L = 2,75 \cdot 10^5$  Дж/кг;  $\rho = 7470$  кг/м<sup>3</sup>;  $T_{\text{пл}} = 1390$  °С. У розрахунках впливу швидкості зварювання діаметр електронної плями прийнято постійним, який дорівнює 2,8 мм.

Розподіл максимальних температур навколо рухомого лінійного джерела теплоти на відстані  $y$  від границі проплавлення можна визначити за рівнянням

$$\frac{1}{T_{\text{max}} - T_0} = \sqrt{2\pi e} \frac{c\rho v_{\text{зв}} h}{IU} y + \frac{1}{T_{\text{пл}} - T_0}. \quad (3.21)$$

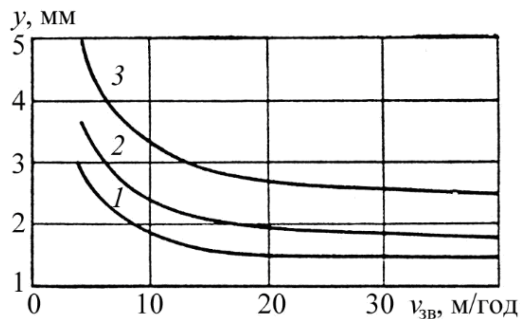
Підставивши у (3.21) значення  $IU$  з (3.19), знаходять

$$y = \frac{\left( \rho v_{\text{зв}} d \left( 2c + \frac{L}{T_{\text{пл}} - T_0} \right) + 2\lambda \right) (T_{\text{пл}} - T_{\text{max}})}{v_{\text{зв}} c\rho \sqrt{2\pi e} (T_{\text{max}} - T_0)}. \quad (3.22)$$

Результати розрахунків за рівнянням (3.22) для сталі ЭП291 наведено на рис. 3.12 [79].

За графіками, зображеними на рис. 3.11 і 3.12, можна вибрати режим зварювання, який забезпечить оптимальні структуру та властивості з'єднань.

Рис. 3.12. Залежність ширини зони термічного впливу від швидкості зварювання сталі ЭП291 при  $T_{\text{max}} = 800$  °С і різній температурі попереднього підігріву:  
1 – 20 °С; 2 – 180 °С; 3 – 350 °С



Слід відзначити, що при виборі параметрів режиму ЕПЗ необхідно враховувати їх вплив на формування шва, не допускаючи випіскування та витікання розплавленого металу, утворення несплавлень, пор та інших дефектів, на що також впливають як фокусна відстань (від фокусуєчої лінзи до фокуса), так і робоча відстань до поверхні деталі, а також положення фокуса променя відносно цієї поверхні.

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

Здебільшого зміна робочої відстані  $L_p$  в інтервалі 200...350 мм суттєво не впливає на процес зварювання. Положення фокальної площини відносно лицьової поверхні виробу задають силою струму фокусуєної лінзи, але необхідно враховувати, що для кожної зварювальної гармати є своя залежність між струмом фокусуєної лінзи і фокусною відстанню. Вона пов'язана з різними емісійними властивостями катодів, максимальними струмами променя (сила струму при мінімальному потенціалі на керуючому електроді біля 220 В), конструктивними особливостями тощо. Тому важливе значення має діагностика електронного променя в установках для ЕПЗ (визначення положення фокуса відносно поверхні деталі, максимальної густини струму та її розподілу по перерізу променя, мінімального діаметра та кута сходження променя). Для діагностики променя розроблено спеціальну комп'ютеризовану систему.

Електронно-променеє зварювання дозволяє отримувати з'єднання, для яких застосовують способи зварювання плавленням, однак його переваги найбільш повно реалізуються при виготовленні стикових з'єднань. Для деяких з'єднань застосовують лише ЕПЗ, наприклад однопрохідне зварювання розташованих на різній висоті стикових швів проникаючим променем. За допомогою ЕПЗ можна отримувати з'єднання з прорізними швами, виконувати зварювання у вузьких щілинах та важкодоступних місцях. Деякі типи з'єднань при ЕПЗ показано на рис. 3.13.

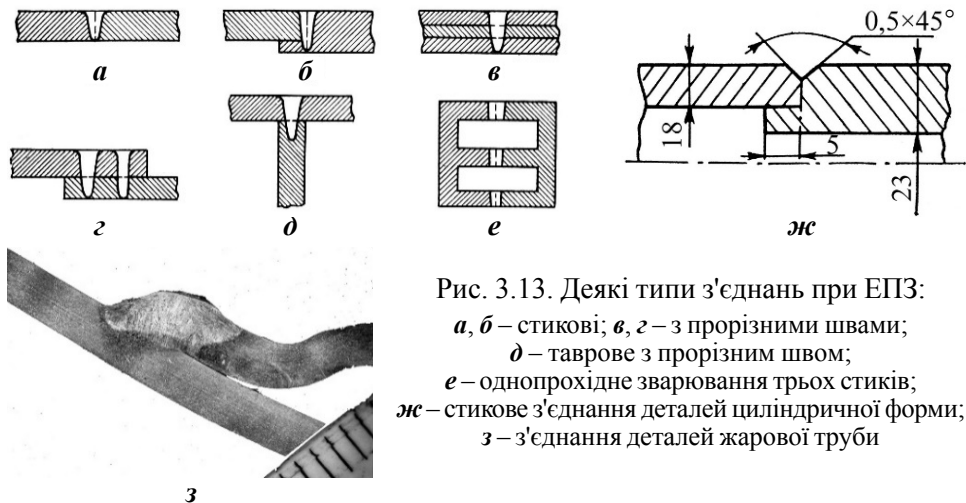


Рис. 3.13. Деякі типи з'єднань при ЕПЗ:  
*a, б* – стикові; *в, з* – з прорізними швами;  
*д* – таврове з прорізним швом;  
*е* – однопрохідне зварювання трьох стиків;  
*ж* – стикове з'єднання деталей циліндричної форми;  
*з* – з'єднання деталей жарової труби

Загальною вимогою для з'єднань усіх типів є висока точність складання деталей під зварювання. Допустимі зазори в зварних стиках не повинні перевищувати 0,1 мм при товщинах до 10 мм та 0,2 мм при більших товщинах. Крайки, що зварюються, повинні бути ретельно очищені і знежирені, тому що при контакті рідкого металу з органічними

### 3. 1. Електронно-променеве зварювання

речовинами останні у вакуумі миттєво випаровуються, викликаючи мікровибухи і дефекти у шві.

На рис. 3.13,*ж*, показано підготовку крайок при ЕПЗ деталей циліндричної форми з конкретними товщинами. Такі деталі складають із натягом і зазором між з'єднаними крайками не більше 0,02 мм. Для точного наведення променя на стик виконано фаску з кутом  $45^\circ$  і глибиною 0,5 мм. Зварювання ведеться з повним проплавленням деталі меншої товщини. Кінець проплавлення металу шва виводиться під її внутрішню циліндричну поверхню. Режим зварювання:  $U = 28$  кВ;  $I = 180$  мА;  $v_{зв} = 45$  м/год; вакуум  $10^{-2}$  Па. Мікроструктуру металу з'єднання наведено на рис. 3.14.

На рис. 3.13,*з* показано з'єднання внапуск деталей турбінної жарової труби з жароміцного сплаву розфокусованим променем. З'єднання не дозволяють використати одну з важливих особливостей ЕПЗ (високу концентрацію енергії), тому для них звичайно застосовують ЕПЗ тоді, коли це необхідно для даного матеріалу або конструкції у зв'язку з іншими перевагами ЕПЗ.

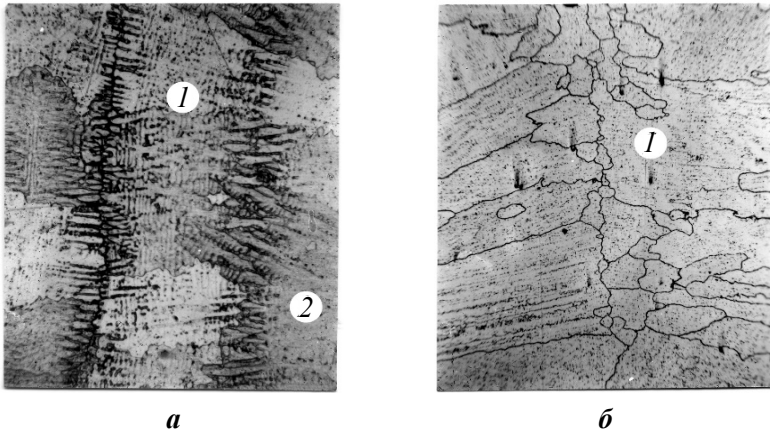


Рис. 3.14. Мікроструктура стикового з'єднання жароміцного нікелевого сплаву ЭП202 (ХН67ВМТЮ):

*a* – після зварювання,  $\times 400$ ; *б* – метал шва після термічної обробки,  $\times 100$ ;  
*1* – шов; *2* – основний метал

З рис. 3.14 видно, що після зварювання метал шва має стовпчасті кристаліти, які в стиковому з'єднанні зустрічаються в центрі шва. Вони ростуть перпендикулярно до поверхні тепловідводу. Після термічної обробки (аустенізація при  $1200^\circ\text{C}$  та старіння при  $850^\circ\text{C}$ ) чітко видно границі стовпчастих кристалітів (див. рис. 3.14,*б*). У центрі шва спостерігається значна різнозернистість металу. Зона термічного впливу дуже вузька. Основний метал зберігає свою структуру майже до поверхні проплавлення.

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

---

При зварюванні відхилення осі потоку електронів від стику повинне бути не більше 0,2...0,3 мм. Воно викликає значні труднощі при зварюванні. Якщо один або обидва зварювані метали є феромагнітними, то внаслідок взаємодії електромагнітних полів з електронним променем він відхиляється від стику. Це призводить до утворення дефектів зварного з'єднання у вигляді непроварів. Магнітні поля найбільш часто обумовлені залишковою намагніченістю, яка формується при обробці та підготовці до зварювання. Рівень магнітного поля залежить від хімічного складу та структури зварюваних матеріалів. Найбільш небезпечна намагніченість уздовж напрямку зварювання, оскільки промінь у цьому випадку відхиляється перпендикулярно до лінії стику.

При складанні окремих деталей з різним напрямком намагніченості важко передбачити відхилення електронного променя. Воно змінюється залежно від значення індукції в каналі проплавлення та над ним, але, в основному, відбувається за рахунок магнітних полів між виробом та електронною гарматою. Зі збільшенням товщини зварюваного металу та при зниженні прискорюючої напруги відхилення променя зростає. Воно суттєво впливає на формування шва при ЕПЗ різнорідних металів. Тому рекомендується зварювання виконувати в декілька проходів тощо.

Для запобігання негативному впливу залишкової магнітної індукції перед ЕПЗ конструкції розмагнічують шляхом установки на нерухомі конструкції електричних контурів зі струмом або переміщення рухомих конструкцій відносно електричного контуру зі змінним струмом постійної амплітуди, або пропускання через конструкцію електричного струму, який змінюється за заданою програмою та інше.

На якість і властивості з'єднань при ЕПЗ істотно впливає вакуум, що обумовлено низьким парціальним тиском залишкових газів. Якщо в особливо чистому аргоні марки А міститься 0,005 % кисню та 0,01 % азоту, то навіть у низькому вакуумі 1,33 Па вміст кисню складає 0,0003 % та азоту 0,001 %. При ЕПЗ у вакуумі  $10^{-1}$ ... $10^{-2}$  Па вміст цих газів складає відповідно не більше  $3 \cdot 10^{-6}$  та  $10^{-5}$  %. Нагрівання та плавлення у вакуумі сприяє дегазації і підвищенню механічних властивостей металу. Це особливо чітко виявляється при зварюванні активних і тугоплавких металів. Зменшення вмісту газів у шві призводить до значного підвищення його пластичності. Найбільш легко видаляється водень, оскільки більшість з'єднань металів з воднем розпадаються при відносно низьких температурах нагрівання. До того ж водень має високу дифузійну рухливість у твердих металах.

Високі захисні властивості вакуумного середовища підтверджені експериментально при зварюванні активних та тугоплавких металів шляхом порівняння твердості металу швів, виконаних електричною дугою в камері з аргонем та ЕПЗ у вакуумі. При зварюванні цирконію – одного з найбільш активних гетерів – твердість металу шва, отриманого в аргоні, майже в 2 рази вища, ніж отриманого у вакуумі. В останньому випадку твердість металу шва близька до твердості відпаленого основного металу. Високу якість вакуумного захисту підтверджують експерименти з молібденом – надзвичайно чутливим до газів металом. Пластичність його з'єднань, виконаних у вакуумі, майже в 2 рази вища, ніж отриманих у камері з контрольованою атмосферою.

При ЕПЗ металів великих товщин ступінь вакууму в робочій камері суттєво впливає на глибину проплавлення. Тому для стабільного проплавлення необхідно забезпечувати стабільний вакуум.

Енергію електронного променя можна використовувати також для різання та наплавлення металів, термічної обробки, дифузійного зварювання тощо.

#### **3.1.3. Зварювальне устаткування**

Електронно-променеві установки поділяють на універсальні і спеціалізовані, але будь-яка установка складається з робочої вакуумної камери з люками завантаження і вивантаження виробів, оглядовими вікнами і механізмами переміщення виробів, вакуумної системи з вакуумними насосами, однієї або декількох електронних гармат із системами електроживлення, контрольно-вимірною апаратури [56, 87]. Залежно від напруги, яка прискорює електрони, розрізняють гармати низьковольтні (20...30 кВ), високовольтні (100...200 кВ) і з проміжною напругою (30...100 кВ). Залежно від призначення гармати забезпечують різну локальність нагрівання. Вони можуть бути стаціонарними або переміщуваними у вакуумній камері. Розміри вакуумних камер електронно-променевих установок визначаються габаритами виробів, для зварювання яких вони призначені. Створено робочі вакуумні камери різних об'ємів, у тому числі об'ємом у сотні кубічних метрів з використанням відповідного вакуумного обладнання, яке було розглянуто в розд. 2.

**Електронні гармати.** Технологічна електронна гармата – складний електронний прилад, у процесі створення якого було вирішено ряд принципових питань. Для фокусування електронного променя до мінімальних розмірів при значній його потужності необхідно, щоб розштовхування електронів у промені, їх розсіювання в газах і парах, теплові швидкості, а також похибки електронної оптики не перешкождали збиранню

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

електронів. У перших гарматах пучок електронів формувався тільки за допомогою прикатодного електрода без додаткових фокусуєчих систем (рис. 3.15,*а*).

Анодом такої гармати була сама деталь. Електростатичне фокусування не дозволяє одержати високу густину енергії в промені. Недолік системи – мала відстань між гарматою і деталлю. На початку 60-х р. ХХ ст. створені гармати з прискорюючим електродом, який знаходиться під потенціалом деталі (див. рис. 3.15,*б*). Застосування такого електрода дозволяє збільшити відстань катода гармати від деталі, полегшує спостереження за процесом зварювання, запобігає електричним пробоям. Ще більш досконалою є гармата з електростатичним і електромагнітним фокусуванням, яке забезпечує електромагнітна фокусуєча система, показана на рис. 3.15,*в*.

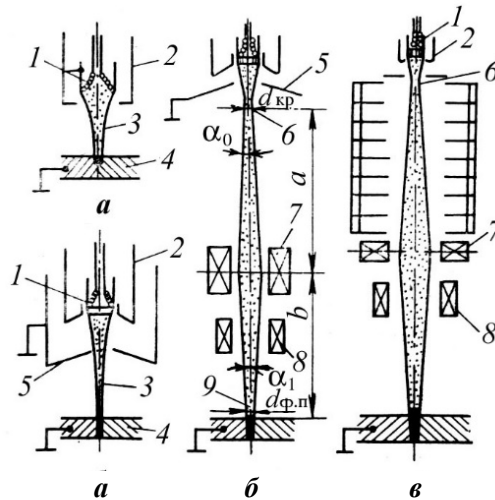


Рис. 3.15. Електронно-оптичні системи зварювальних гармат:

- а* – однокаскадна без електрода, який прискорює електрони;
- б* – однокаскадна з анодом для прискорення електронів;
- в* – комбінована з електростатичним і електромагнітним фокусуванням;
- з* – з прискорювальною трубкою; 1 – катод; 2 – прикатодний електрод;
- 3 – траєкторія електронів; 4 – деталь; 5 – анод для прискорення електронів;
- б* – кросовер (мінімальний переріз променя); 7 – фокусуєча магнітна лінза;
- 8 – електромагнітна система, що відхиляє промінь; 9 – фокусна пляма;
- $\alpha_0$  – половинний кут розходження променя після кросовера;
- $\alpha_1$  – половинний кут сходження променя на деталі;  $d_{кр.}$  – діаметр кросовера,
- $d_{ф.п.}$  – діаметр плями у фокусі

Підвищенню напруги електронно-променевої гармати та енергії електронів перешкоджає недостатня електроізоляційна стійкість вакуумного

проміжку анод-катод. При напругах вище 50 кВ імовірність електричних пробивів між анодом і катодом зростає. Тому для одержання електронного променя високої енергії застосовують електронно-оптичні системи, в основу яких покладено принцип прискорення електронів у прискорювальній трубці з однорідним електричним полем уздовж її осі. Пучок електронів малої енергії, що вийшов із катода, формується і поступово прискорюється в трубці, досягаючи на виході з неї максимальної енергії. Схему градієнтної електронно-оптичної гармати показано на рис. 3.15,г.

Фокусування електронного променя здійснюють однією або двома магнітними лінзами. У гарматах з однією лінзою для зменшення діаметра променя на деталі потрібно зменшувати відношення  $M = b/a$  (див. рис. 3.15,в), тобто розташовувати лінзу далеко від анода і близько до деталі. При наявності двох лінз першу з них розташовують близько до анода, що зменшує діаметр електронного променя в основній лінзі. Лінзи виконують у вигляді котушок з великим числом витків у залізному екрані особливої форми.

Для переміщення і корегування електронного променя по стику використовують магнітні системи. Для зварювання металів товщиною 3...5 мм придатні системи з кутовим відхиленням променя. При зварюванні великих товщин така система може давати перекося шва відносно вертикальної площини стику. Тому для таких товщин доцільно застосовувати дві пари систем, розташованих на різній висоті, що забезпечують паралельний перенос променя. Відхиляючу систему звичайно виготовляють у вигляді чотирьох котушок, з'єднаних послідовно попарно і розташованих під кутом  $180^\circ$  одна до іншої. Це плоскі котушки з діаметром  $d$  умовного циліндра. Змінюючи струм у котушках, можна встановлювати промінь у будь-якій точці і забезпечувати його рух по складних траєкторіях. Число ампер-витків пари котушок, необхідне для відхилення пучка електронів з енергією  $U$  на кут  $\theta$ , визначається рівнянням

$$(I\omega)_{\text{відх}} = 2,65 \frac{d\sqrt{U}}{l} \sin\theta, \quad (3.23)$$

де  $I$  – сила струму в котушці;  $\omega$  – число витків котушки;  $l$  – ширина котушки.

У промисловості застосовується автоматична система спрямування променя по стику. Для цього в ІЕЗ ім. Є.О. Патона запропоновано використовувати ефект зниження вторинної емісії електронів при проходженні зондувального електронного пучка через стик крайок.

Основну роль у формуванні електронного променя відіграє прикатодна електронно-оптична система – прожектор гармати. Здебільшого



### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

---

у прожекторах зварювальних гармат використовують триелектродні системи. Вони складаються з катода, керуючого електрода з отвором та прискорюючого анода. Керуючий електрод ще називають фокусуючим або прикатодним і рідше – модулятором. Катодний вузол гармати кріпиться на високовольтному ізоляторі. Живлення до прожектора гармати подається броньованим високовольтним кабелем. Сила струму променя регулюється шляхом подачі негативного керуючого потенціалу на прикатодний електрод прожектора, зміною прискорюючої напруги або рідше зміною сили струму розжарення катода. У випадку імпульсно-модульованого режиму зварювання на прикатодний електрод подаються негативні прямокутні імпульси моделюючої напруги.

Католи електронних гармат працюють у жорстких умовах, обумовлених високотемпературним нагріванням, іонним бомбардуванням, окисненням і забрудненням парами металів, що зварюються. Для виготовлення катодів використовують вольфрам, тантал та інші тугоплавкі метали з низькою роботою виходу електронів. Застосовують лантанборидні ( $\text{LaB}_6$ ) католи, які мають високу емісійну здатність при відносно низькій робочій температурі (1600 °C). По мірі металізації поверхні катода тугоплавкими металами для збільшення емісії його робочу температуру необхідно підвищувати до 1900...2000 °C. Конструктивно католи виконують з прямим або з непрямым нагріванням. Католи з непрямым нагріванням мають більш рівномірну по поверхні густину емісії і є еквіпотенціальними. Лантанборидні католи виготовляють із непрямым нагріванням. Католи можуть бути у вигляді плоскої спіралі, штирові, плоскі тощо. Для одержання в промені великих потужностей застосовують гармати з плоским катодом.

Разом із гарматами, які мають термоелектронні католи, розроблено газорозрядні гармати з формуванням електронного пучка за рахунок іонного бомбардування катода з алюмінію, який має високий коефіцієнт вторинної емісії електронів при іонному бомбардуванні і малу швидкість розпилювання. Вибором відповідної форми катода можна фокусувати пучки в точку, лінію або кільце. Положення фокуса від напруги не залежить. При відстані між деталлю і катодом до 100 мм і різниці потенціалів більше 10 кВ розсіювання електронів мале і близько 75 % енергії передається деталі [21].

Іншим типом газорозрядних гармат є гармати з порожнім катодом. Вони можуть працювати в режимі гарячого або холодного катода. У першому випадку електронний пучок усередині порожнього циліндричного катода формується під дією електричного поля або за рахунок термо-

### 3. 1. Електронно-променеве зварювання

електронної емісії, а також вторинної емісії під дією іонного бомбардування. У результаті бомбардування внутрішні стінки катода нагріваються. В іншому випадку електронний пучок утворюється в порожнині катода при іонізації атомів аргону в тліючому розряді і в результаті вторинної емісії електронів від іонного бомбардування. Промінь фокусується за допомогою електромагнітної системи. Для емісії та прискорення електронів на катод і прискорюючий електрод подається напруга до 50 кВ. Відібрані з плазми електрони формуються в промінь і фокусуються магнітним полем фокусучої системи.

Перевагою газорозрядних гармат є те, що вони працюють при значно більших тисках, ніж гармати з розжарюваним катодом. Ці гармати можна використовувати в різних технологічних процесах.

Однією з головних вимог до систем електроживлення електронно-променевих гармат є висока стабільність енергетичних параметрів, тому що навіть короточасні і порівняно малі їх зміни можуть істотно вплинути на параметри шва. Коливання прискорюючої напруги призводять не лише до коливань потужності променя, але й до зміни фокусування та кута відхилення. Тому для зварювання рекомендується використовувати стабілізовану апаратуру. Щоб зменшити пульсації напруги, встановлюють фільтри, які складаються з конденсаторів і дроселів, що значно ускладнює системи електроживлення гармат. Великогабаритне устаткування для електронно-променевого зварювання забезпечується промисловими телевізійними установками.

Залежно від глибини вакууму установки ЕПЗ поділяються на три класи: для зварювання у високому вакуумі ( $10^{-2} \dots 10^{-3}$  Па), проміжному вакуумі ( $10^{-1}$  Па) та з виводом електронного променя в середовище з атмосферним тиском. У високовакуумних установках можна отримати гостросфокусований електронний промінь з високою концентрацією енергії в плямі нагрівання. При зварюванні в проміжному вакуумі концентрація енергії суттєво знижується за рахунок збільшення розсіювання електронів.

Для зварювання при атмосферному тиску характерна низька концентрація енергії внаслідок великого розсіювання електронного променя при проходженні через газове середовище між гарматою та виробом. У цьому випадку електронний промінь формується у високому вакуумі ( $10^{-2} \dots 10^{-3}$  Па) і за допомогою спеціальних пристроїв виводиться в середовище інертного газу або на повітря. Одним з варіантів виводу променя в газове середовище є створення електронних гармат зі ступінчастою відкачкою. У гарматі виділяється декілька камер, з яких ведеться автономна відкачка газів. У міжелектродному проміжку створюється

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

вакуум до  $10^{-2}$  Па, але з виходом променя тиск зростає. Відомі й інші способи виводу променя електронів в атмосферу, наприклад запирання вихідного отвору за допомогою надзвукового газового струменя або застосування вікна з танталової фольги, що пропускає електрони і не пропускає газ.

У промисловості експлуатується велика кількість універсальних та спеціалізованих установок. В установках типу ЕЛУ (ЕЛУ-1, У-570, ЕЛУ-13 та ін.) використовуються електронні гармати ЕП-60, ЕП-60М, ЕП-60/2,5, ЕП-60/10М з прискорюючою напругою 60 кВ та потужністю в промені 2,0...10,0 кВт. За конструкцією ці установки подібні, але відрізняються габаритами вакуумних камер, конструкцією зварювальних маніпуляторів та допоміжних механізмів, а також параметрами електронно-оптичних систем. Якщо універсальна установка ЕЛУ-2 має вакуумну камеру діаметром 500 мм і довжиною 400 мм, то установка ЕЛУ-13 має камеру розмірами 10000 3400 5400 мм. Загальний вигляд універсальної установки У-570 показано на рис. 3.16.

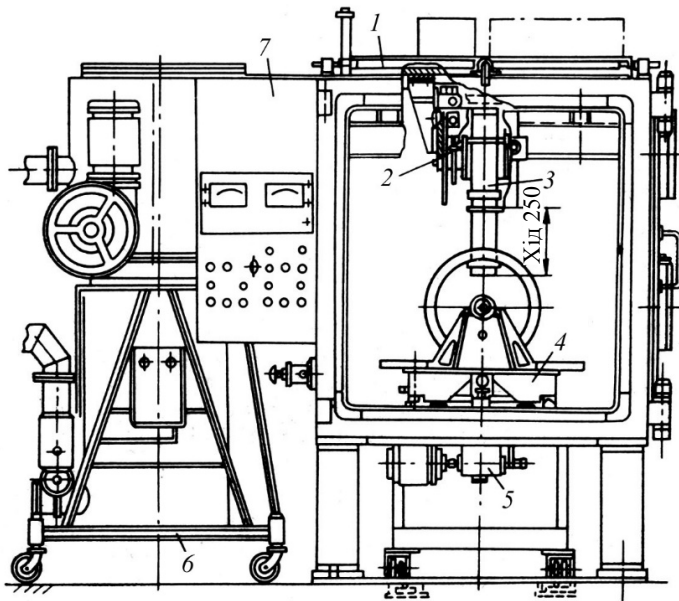


Рис. 3.16. Загальний вигляд універсальної електронно-променевої установки У-570:

- 1 – поворотна плита; 2 – механізм переміщення гармати; 3 – електронна гармата;
- 4 – універсальний зварювальний маніпулятор; 5 – привід маніпулятора;
- 6 – вакуумна система; 7 – пульт керування

Вакуумна камера установки, габарити якої  $\times 1200 \times 1200 \times 1200$  мм, виконана з нержавіючої сталі товщиною 25 мм. У верхній частині камери зроблено вікно діаметром 1020 мм, що закривається поворотною пли-

тою 1, на напрямних якої встановлюється механізм переміщення гармати. Універсальний зварювальний маніпулятор 4 являє собою візок із привідною й опорною балками для зварювання виробів із горизонтальною віссю обертання та планшайбою для зварювання плоских виробів з вертикальною віссю обертання.

Установка У-570 має електронну гармату УЛ-141 з джерелом живлення У-843 (енергоблок) ЭЛА-60/60. Джерела живлення оснащені контролерами для автоматичного керування основними параметрами ЕПЗ. Вони використовуються в багатьох установках для ЕПЗ, наприклад ЭЛУ-21, У-736, УЛ-209, ЭЛУ-9 та ін. Енергоблок ЭЛА-60/60 має номінальну потужність променя 60 кВт, прискорюючу напругу 60 кВ, нестабільність прискорюючої напруги 1 %, силу струму променя 1000 мА, нестабільність сили струму  $\pm 1$  %, нестабільність струму фокусування променя  $\pm 10^{-2}$  %, живлення мережі 100 кВт.

У промисловості використовують установки для ЕПЗ великогабаритних виробів з локальною герметизацією, наприклад установка У-101 для зварювання труб, установка КЛ-104 для зварювання врізних елементів великогабаритних обичайок з алюмінієвого сплаву АК8. Спеціалізовані установки використовують для зварювання труб з трубними дошками (УЛ-178, УЛ-206), виробів електронної техніки (А.306.02, А.306.05), біметалічних стрічкових машинних пил та ножівок (ЭЛС-101), тепловідляючих елементів атомних електростанцій (У-250 з плазмовим катодом) та багатьох інших виробів.

#### ***3.1.4. Особливості та сфери застосування електронно-променевого зварювання***

Розглядуване зварювання є одним із процесів, які належать до електронно-променевих технологій, інші – електронно-променеве напилення з парової фази, плавлення титану та отримання композиційних матеріалів із диспергованого розплаву, різання тощо. Усі ці процеси успішно розвиваються завдяки можливостям високої концентрації енергії, проведення процесів у вакуумі та повної автоматизації процесів.

Однією з головних переваг ЕПЗ є висока концентрація енергії і можливість одержання вузької і глибокої зони проплавлення, площа якої в десятки разів менша, ніж при дуговому зварюванні. При електронно-променевому зварюванні потрібно в 10–15 разів менше енергії, ніж при електродуговому. Висока зосередженість нагрівання і мінімальна площа зони проплавлення забезпечують незначні залишкові деформації виробів.

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

---

Вузька ЗТВ зменшує небезпеку неприпустимих змін фізико-механічних властивостей основного металу, хоча не виключає виникнення навколошовних мікротріщин у сталях і сплавах, схильних до їх утворення.

Інша важлива перевага ЕПЗ – можливість використання ефективного вакуумного захисту і поліпшення властивостей металу шва в результаті вакуумного переплаву. Економічна доцільність зварювання у вакуумі визначається не лише підвищенням фізико-механічних показників металу, але і значно меншими витратами на створення вакууму в порівнянні зі створенням захисного високочистого інертного або контрольованого середовища.

Мінімальні деформації зварюваних виробів та високі фізико-механічні властивості з'єднань після ЕПЗ дозволяють скоротити або цілком виключити наступну механічну і термічну обробки.

Сучасне устаткування для ЕПЗ має системи комп'ютерного керування, діагностики стану та протокольне оформлення результатів зварювання. Комп'ютерна діагностика дає положення фокуса, густину енергії та зображення на екрані дисплея поздовжніх перерізів променя, сигналізує про необхідність заміни зношеного катода тощо.

Широко використовують ЕПЗ у промисловості, незважаючи на такі недоліки способу, як складність зварювального устаткування та необхідність висококваліфікованих кадрів. Цим способом зварюють не лише високолеговані сталі і сплави, активні та тугоплавкі метали, але й конструкційні сталі при виготовленні виробів з малим припуском або в остаточний розмір.

Цей вид зварювання використовується в енергетичному та транспортному машинобудуванні, при виготовленні аерокосмічної техніки, авіаційних двигунів та агрегатів, виробів електронної техніки, теплоділяючих елементів атомних станцій тощо. Воно широко застосовується при виготовленні газотурбінних установок різного призначення для зварювання високолегованих сталей різних структурних класів, жароміцних сталей і сплавів, титану та його сплавів тощо.

Створення на Державному підприємстві "Науково-виробничий комплекс газотурбобудування "Зоря–Машпроект" сучасних газотурбінних установок для морського флоту, газоперекачування та теплової енергетики стало можливим завдяки широкому застосуванню ЕПЗ [65]. Основу нових парогазових агрегатів складає газотурбінна установка ГТГ-110, що відзначається найбільшою потужністю. Це відносно легка енергетична установка потужністю 110 МВт. Висока ефективність та великий ресурс роботи установки досягнуто завдяки використанню в ній звар-

### 3. 1. Електронно-променеве зварювання

них дисків турбіни, передньої цапфи, барабанів роторів та корпусів компресорів високого і низького тисків, деталей редукторів, жарових труб, камери згоряння та інших вузлів і деталей. Ескізи корпусу компресора та цапфи-диска енергетичної установки показано на рис. 3.17.

Корпус компресора є товстостінною оболонкою товщиною від 60 до 110 мм. Інші розміри показано на ескізі. Матеріал – сталь ЭП609, що містить близько 0,06С, 10,5Сr, 1,5Ni, десяти частки Cu, Мо, V, Si % (мас.). Корпус складається з чотирьох відливок, механічна обробка яких виконується з високою точністю в заданий розмір. Крайки під зварювання обробляють із чистотою  $R_a = 1,25$ .

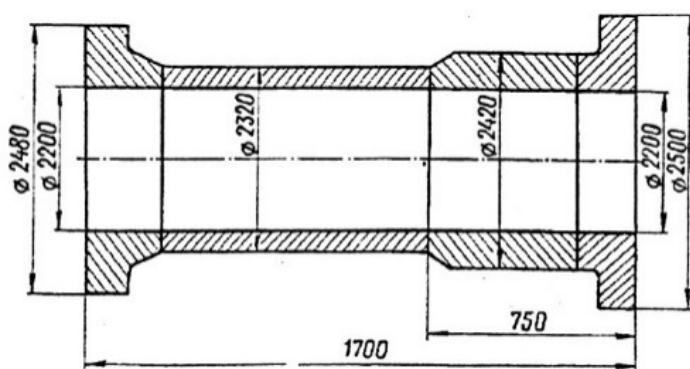


Рис. 3.17. Ескіз корпусу компресора газової турбіни

Заготовки перед зварюванням проходять термічну обробку: гартування від 1130 °С з витримкою 11 год, охолодження в маслі, відпуск при 630 °С з витримкою 11 год, охолодження з піччю до 200 °С, далі – на повітрі. Перед складанням заготовки корпусу та зразки-свідки знежирюються ацетоном, а зварювані крайки додатково протираються спиртом. Заготовки складаються на планшайбі зварювальної установки ЭЛУ-21, забезпечуючи радіальне та торцеве биття не більше 0,1 мм, і закріплюються спеціальними притискачами.

Параметри зварювання вибираються з умови бездефектного стабільного проплавлення з паралельними стінками шва та задовільного формування шва із зовнішньої та зворотної сторін. Зварювання виконується горизонтальним променем з параметрами режиму:  $U = 60$  кВ,  $I = 560$  мА,  $v_{зв} = 6$  м/год при товщині 110 мм та  $U = 60$  кВ,  $I = 370$  мА,  $v_{зв} = 12$  м/год при товщині 60 мм. В обох випадках вакуум дорівнює  $1,33 \cdot 10^{-2}$  Па, робоча відстань  $L_p = 200$  мм. Після зварювання для зняття зварювальних напружень та покращення структури зварних з'єднань

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

проводиться термічна обробка: відпуск при температурі 680 °С з витримкою 4 год, охолодження з піччю до 200 °С, далі – на повітрі.

Механічну обробку зовнішніх та внутрішніх поверхонь зварних з'єднань виконують із чистотою  $R_a = 1,25$ . Якість зварних з'єднань перевіряється ультразвуковим контролем.

При виготовленні корпусу компресора більш складні проблеми виникають у зв'язку з необхідністю приварювання до корпусу фланців горизонтального рознімання, але вони також успішно вирішені застосуванням ЕПЗ.

Інший приклад успішного використання ЕПЗ – виготовлення передньої цапфи-диска – показано на рис. 3.18.

Цапфа-диск виготовляється зварюванням чотирьох деталей, причому шов, що з'єднує хвостовик (зварені деталі 1 і 2) з диском 3, знаходиться у важкодоступному місці, де зварювання іншими способами неможливе.

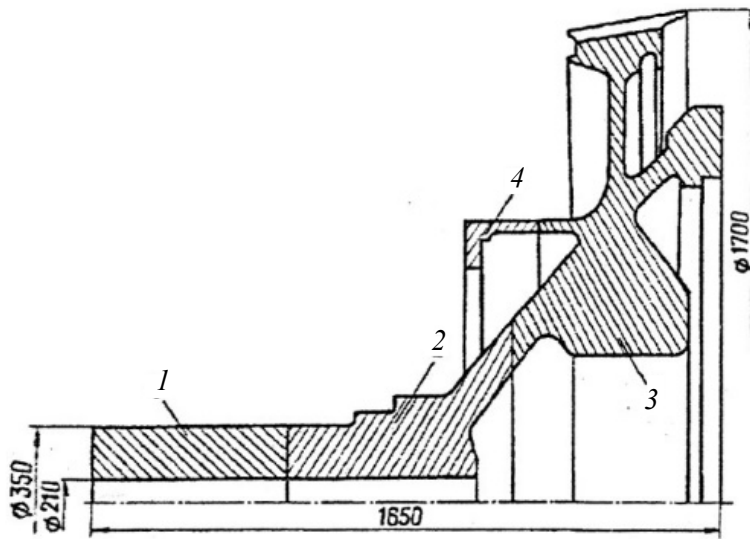
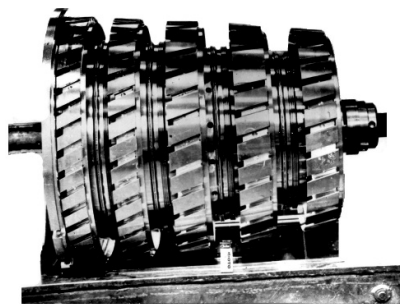


Рис. 3.18. Ескіз передньої цапфи-диска енергетичної установки:  
1, 2 – деталі хвостовика цапфи; 3 – диск; 4 – проставка

Електронно-променеве зварювання використовується також при виготовленні ротора компресора газотурбінної установки. Загальний вигляд ротора компресора після ЕПЗ дисків показано на рис. 3.19.

Зварювання виконується на установці У-570 з гарматою У-530С при наведенні електронного променя на стик за допомогою приладу "Приціл-1".

Рис. 3.19. Загальний вигляд ротора компресора низького тиску після ЕПЗ



В усьому світі ЕПЗ широко використовується при виготовленні деталей турбін, ракет, автомобілів тощо завдяки високій якості та надійності з'єднань. Наприклад, авіаційне підприємство MTU (Мюнхен) за інформаційним проспектом фірми "MesserGriesheim GmbH" використовує електронний промінь з початку 60-х рр. XX ст. Для ЕПЗ деталей з аустенітних, теплостійких та жароміцних сталей і сплавів титану, алюмінію, міді, а також інших матеріалів створене нове покоління електронно-променевого зварювального устаткування з робочою камерою об'ємом 11 м<sup>3</sup>. Використовуються сучасні системи числового програмного керування, які забезпечують автоматизацію процесу, контроль та запис із графічним зображенням усіх важливих параметрів, позицій променя та часу зварювання. Усі записи фіксуються в пам'яті машини. Зварюють напрямні апарати, ротори, вали, корпуси турбін та компресорів, камери згоряння тощо. На кожній деталі промінь гравірує реєстраційний номер, за допомогою якого можна будь-коли відтворити всі параметри режиму зварювання. Допускається відхилення прискорюючого напруження і сили струму променя до 1 %, сили струму фокусуєної лінзи – до 0,5 %. Разом з активним контролем якості зварювання в сучасному устаткуванні забезпечується ультразвуковий контроль з'єднань у процесі зварювання, наприклад при зварюванні роторів.

## 3.2. Лазерне зварювання та різання

### 3.2.1. Властивості та генерація лазерного променя

Джерелами випромінювання світла можуть бути сонце, вугільна дуга, дугові газорозрядні лампи тощо, але високу густину енергії та локальність нагрівання дозволяють отримати лише оптичні квантові генератори (ОКГ) або лазери. *Лазер* – термін, який утворюється з початкових букв англійських слів, що складають фразу: посилення світла шляхом використання стимульованого випромінювання (*light amplification by stimulated emission and radiation*).



### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

---

Випромінювання ОКГ характеризується рядом унікальних властивостей: *високою монохроматичністю, значним ступенем когерентності, великою потужністю та паралельністю руху, які відсутні в інших джерелах випромінювання. Завдяки цим властивостям лазерний промінь* використовують як для зварювання, так і для різання матеріалів [13, 14].

Положення електронів в атомах визначається їхньою енергією. Перехід електрона з верхнього рівня на нижній супроводжується випромінюванням електромагнітної енергії відповідно до рівняння М. Планка. Оскільки атоми металів являють собою багаторівневу електронну систему, то при нагріванні металу в атомі відбувається велике число спонтанних (довільних) переходів електронів з верхніх рівнів на нижчі, при кожному з яких відбувається випромінювання із частотою  $\nu_1, \nu_2$  і т. д. Ще більш різноманітним є спектр випромінювання, якщо речовина являє собою суміш атомів. Тому нагріті тіла дають випромінювання в широкому діапазоні довжин хвиль. В ОКГ стимулюються переходи тільки на чітко визначеному рівні, а тому їхнє випромінювання можна характеризувати однією частотою або довжиною хвилі. Монохроматичний промінь фокусується лінзою практично в точці на відміну від білого світлового променя, що фокусується на значній площі, утворюючи спектр унаслідок неоднакового заломлення склом лінзи світлових хвиль різної довжини.

З монохроматичністю випромінювання пов'язана його когерентність, тобто відповідність характеристик випромінювання, утвореного в один час різними рознесеними в просторі джерелами (просторова когерентність) або тим самим джерелом, але в різні моменти часу (часова когерентність). Чим точніше хвиля зберігає свою частоту, тим вищим є ступінь її когерентності в часі. Просторова когерентність обумовлює високу спрямованість випромінювання і можливість його фокусування за допомогою оптичних систем на ділянку дуже малих розмірів. Можна досягти діаметра світлової плями до декількох мікрометрів. Це дозволяє створити на поверхні, що опромінюється, при сучасній лазерній техніці густину теплової потужності вище  $10^8 \dots 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>, а цього достатньо не лише для плавлення, але і випаровування всіх відомих матеріалів.

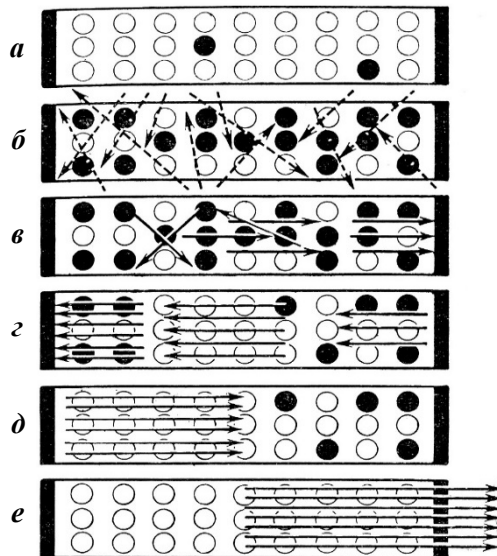
В основі принципу дії квантових генераторів і підсилювачів лежить стимульоване випромінювання збуджених атомів, тобто атомів, у яких значна кількість електронів переведена на верхній рівень. Такий стан називають *станом з інверсною заселеністю рівнів*. Він може бути створений, наприклад зовнішнім джерелом випромінювання з визначеною

### 3. 2. Лазерне зварювання та різання

довжиною хвилі, потоком електронів або радіоактивних частинок. Цей стан є нестабільним, і через деякий проміжок часу збуджений атом може спонтанно перейти в рівноважний стан та випромінювати енергію у вигляді фотонів. Поки атом знаходиться в збудженому стані, його можна спонукати випускати енергію під впливом зовнішнього фотона. Таке випромінювання називається *стимульованим* і використовується в квантових підсилювачах. Стимульоване випромінювання підсилює промені, що падають на атом. У цьому процесі хвиля, що випромінюється, в точності збігається за фазою з тією, під дією якої вона виникла. Квантові генератори перетворюють електричну, теплову, хімічну енергію зовнішнього джерела в енергію монохроматичного когерентного променя. В ОКГ використовують різні потужні способи збудження атомів. Початок генерації випромінювання викликає довільний перехід одного або декількох збуджених електронів з верхнього рівня на нижній.

Для значного посилення стимульованого (індуктованого) випромінювання необхідно, щоб у випромінюванні брало участь якнайбільше число збуджених атомів. Цього можна досягти, помістивши збуджені атоми між двома дзеркалами. Випромінювання, що спрямоване перпендикулярно до дзеркал, багаторазово відбивається від них, проходить через збуджену речовину і підсилюється. Якщо одне з дзеркал є напівпрозорим, енергія вийде назовні у вигляді вузькоспрямованого потужного монохроматичного і когерентного променя. Цей процес зображено на рис. 3.20.

Рис. 3.20. Принцип формування вузькоспрямованого монохроматичного і когерентного променя в твердотільних лазерах:  
**а** – два атоми (●) активної речовини, які знаходяться в збудженому стані;  
**б** – частина атомів активної речовини, яка переходить у збуджений стан; під дією електромагнітного поля зовнішнього джерела;  
**в** – частина випромінювання збуджених атомів, що рухається перпендикулярно до дзеркал;  
**г, д** – лавиноподібне посилення стимульованого випромінювання після його багаторазового відбиття від дзеркал;  
**е** – вихід стимульованого випромінювання через напівпрозоре дзеркало



### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

З рис. 3.20 видно, що зростає амплітуда лише тих хвиль, які рухаються перпендикулярно до дзеркал. Отримавши значне посилення, випромінювання покидає активну речовину. Промінь має вузьку спрямованість, оскільки через напівпрозоре дзеркало випромінюються лише ті хвилі, які змогли тисячі разів пройти активну речовину, не відхилившись від поздовжньої осі резонатора. Теоретично кут розходження променя визначається рівнянням

$$\theta = 1,22 \frac{\lambda}{d} \text{ рад,}$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі променя;  $d$  – діаметр торця активної речовини.

Лазери можуть бути твердотільними, рідинними, газовими тощо. У твердотільному лазері як випромінювач використовуються кристалічні або аморфні речовини, в які вводяться домішки певних оптично активних елементів. Лазерне випромінювання обумовлене зміною енергетичних станів електронів домішкових атомів. Основна речовина (матриця) безпосередньо участі в генеруванні випромінювання не бере, але побічно впливає на оптичні характеристики всього середовища. Оптично активна речовина вводиться в матрицю в невеликих кількостях. Випромінювачем може бути рубін, силікатне або фосфатне скло з неодимом, ітрій-алюмінієвий або алюмонатрієвий гранат з неодимом тощо.

Енергетичну схему квантового генератора на кристалі рубіну показано на рис. 3.21,*а*, а оптичну – на рис. 3.21,*б*.

На рис. 3.21,*а* показано основний стан атомів (I), перехід електронів на верхній рівень (II), метастабільний збуджений атом (III) та стимульоване випромінювання з характеристичною довжиною хвилі (IV).

Рубін являє собою кристал оксиду алюмінію ( $Al_2O_3$ ), в якому невелика кількість іонів алюмінію замінена іонами хрому  $Cr^{+++}$  (0,03...0,05 %). Такий рубін має блідо-рожевий колір. При вмісті 0,5 % хрому він набуває вишневого кольору. Кристал рубіну обробляють у вигляді стрижня, діаметр і довжина якого визначають потужність випромінювання. Його торці полірують, забезпечують оптично плоскі та паралельні поверхні, які посріблюють для відбивання променя. Вихідний кінець кристала є напівпрозорим. Відбивні дзеркала можуть бути виготовлені окремо, і між ними встановлюють рубіновий стрижень. Дзеркала та оптичноактивне середовище утворюють резонатор ОКГ. Джерелом широко-смугового світла для оптичного накачування рубіну служить ксенонова газорозрядна лампа.

### 3. 2. Лазерне зварювання та різання

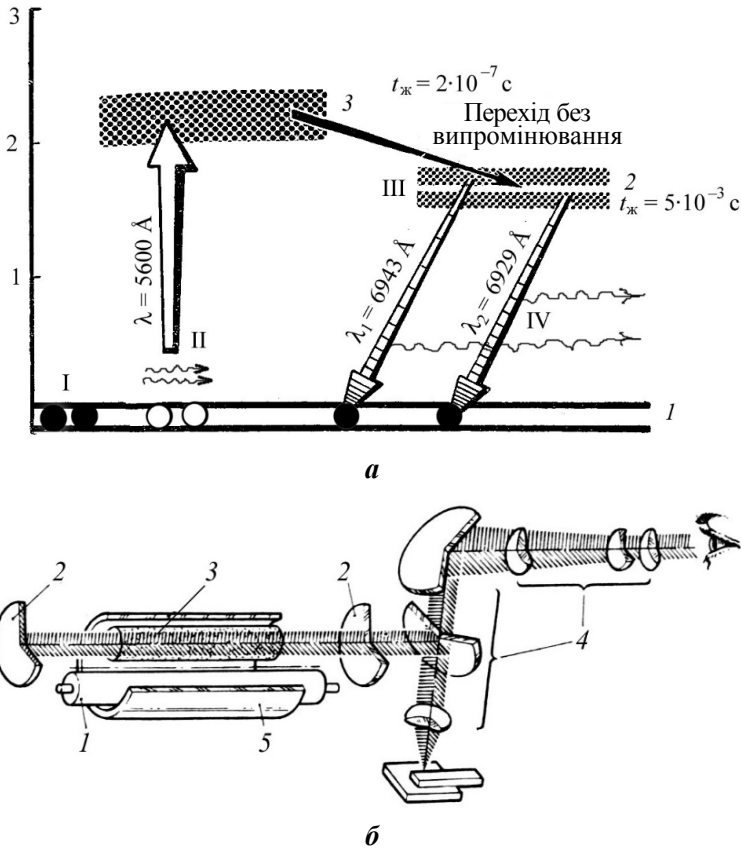


Рис. 3.21. Енергетична (а) та оптична (б) схеми квантового генератора на кристалі рубіну:

- 1 – зовнішнє джерело збудження атомів (ксенонова лампа); 2 – дзеркала резонатора;  
 3 – стрижень з оптичноактивною речовиною; 4 – система фокусування випромінювання та спостереження за місцем зварювання;  
 5 – циліндричне дзеркало освітлювача

Іони хрому, що знаходяться в основному стані I, поглинаючи фотони (хвилясті стрілки), збуджуються, та їхні електрони переходять на вищий рівень 3 у стан II. Для цього із широкої смуги випромінювання лампи необхідне лише випромінювання з довжиною хвилі  $5600 \text{ \AA}$ . На верхньому рівні електрони можуть знаходитися (час "життя"  $t_{\text{ж}}$ ) лише  $2 \cdot 10^{-7} \text{ c}$ . Потім вони переходять на рівень 2. При цьому енергія не випромінюється, а віддається кристалічній ґратці. На рівні 2 електрони можуть знаходитися  $5 \cdot 10^{-3} \text{ c}$ . Оскільки час перебування електронів на рівні 2 майже на чотири порядки більший, ніж на рівні 3, то через деякий час усі електрони

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

рівня 3 накопичуються на рівні 2. Так виникає інверсне заселення електронами рівня 2 і виконується перша умова стимульованого випромінювання. Після цього достатньо випромінювання від переходу на нижній основний рівень одного з електронів, щоб почалося лавиноподібне випромінювання з довжиною хвилі близько 0,7 мкм. У дійсності рубіновий лазер має випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda_1 = 0,6943$  мкм та  $\lambda_2 = 0,6929$  мкм, оскільки в твердому тілі відбувається розщеплення рівнів.

Багаторазово відбиваючись від дзеркал, коли випромінюються всі іони активного елемента, промінь виходить з резонатора через напівпрозоре дзеркало, збирається лінзою і фокусується на виробі (див. рис. 3.21,б).

Принцип дії, параметри і можливості твердих лазерів на рубіні і склі з неодимом приблизно однакові. Певна різниця між ними обумовлена відмінністю у властивостях матриць та у схемах генерації випромінювання іонами хрому і неодиму. Концентрація активних іонів неодиму в склі складає 2...6 %, що значно більше, ніж у рубіні, і забезпечує значно більшу питому енергію випромінювання. На рубіні ККД лазерів не перевищує 1 %, а на склі з неодимом досягає 2...3 %. Найбільш високий ККД мають напівпровідникові лазери, що використовують енергію електричного струму, який протікає через область *p-n* переходу. Їх ККД складає 40 %, але може бути значно вищим.

Напівпровідники, як і ізолятори між зонами валентності і провідності, мають заборонену зону, але її енергетичний бар'єр значно нижчий, ніж в ізоляторів, і складає 0,1...1,0 еВ. Певне енергетичне збудження може перевести електрони в зону провідності і забезпечити її інверсне заселення. Кристал стає провідником, але подолання забороненої зони призводить до втрат енергії.

Введення в напівпровідник домішок також може впливати на його електропровідність та енергетичний бар'єр. Наприклад, розглянемо провідність кремнію (IV група) при введенні фосфору (V група) та індію (III група). При малих концентраціях атоми фосфору та індію заміщують атоми кремнію в кристалічній ґратці. При цьому фосфор має на один валентний електрон більше, а індій – на один електрон менше, ніж кремній. Зазвичай електрон переходить у зону провідності, що збільшує провідність кремнію. У атома індію для утворення зв'язку з атомом кремнію одного електрона не вистачає і у валентній зоні стає на один електрон менше, тобто утворюється "дірка", яка відіграє роль позитивного заряду та є ефективним носієм електричного струму і також підвищує провідність кремнію.

Домішкові атоми фосфору або іншого елемента з V групи називають донорами, або домішками *n*-типу, а домішки індію або іншого елемента з V групи – акцепторами, або домішками *p*-типу. В результаті відбувається перерозподіл електронів між енергетичними рівнями валентної зони і зони провідності з можливим перезаселенням (інверсне заселення) верхнього енергетичного рівня. Обернений перехід електронів з більш високого рівня у валентну зону супроводжується випромінюванням фотонів.

Інверсну заселеність у напівпровідниках отримують, як правило, за допомогою імпульсного електричного струму. Частота випромінювання лазера відповідає частоті імпульсів струму. Напівпровідниковий лазер може працювати не лише в імпульсному, але і в безперервному режимах.

Як активну речовину напівпровідникового лазера використовують, наприклад, арсенід галію, який містить домішки *n*-типу. Його заготовку у формі куба з ретельно відполірованими паралельними гранями, які відіграють роль дзеркал, та припаяними контактами (Mo+Au і Au+Ag) до двох протилежних граней, які перпендикулярні до відполірованих, називають напівпровідниковим діодом. Величина діода менша від голівки англійської шпильки, довжина хвилі випромінювання 0,84 мкм, робоча температура +47 °С.

У рідинних лазерах як активні середовища використовуються розчини неорганічних з'єднань рідкісноземельних елементів (переважно неодиму) або розчини органічних речовин.

У газових лазерах активним середовищем є газ, суміш газів або суміш газів з парами металу. Особливістю активного газового середовища є його висока оптична однорідність, що дозволяє застосовувати великі оптичні резонатори. Важлива перевага газових лазерів – здатність працювати як у безперервному, так і в імпульсному режимах. Лазери характеризуються великим діапазоном потужностей і досить високим ККД (до 20 %). Інверсна заселеність енергетичних рівнів у газових лазерах досягається різними способами (бомбардування швидкими електронами, швидке розширення попередньо нагрітої газової суміші, фотоіонізація, тліючий розряд, імпульсний розряд при атмосферному і високому тисках тощо). Звідси з'явилося різноманіття назв: газорозрядний, газодинамічний, хімічний та ін.

Лазери можуть бути імпульсної або безперервної дії. Якщо заселеність верхнього рівня миттєво падає до нуля, то випромінювання припиняється. Наступний імпульс випромінювання буде можливим через деякий час. Якщо в процесі випромінювання заселеність верхнього рівня підтримується весь час тим або іншим способом і зриву випромінювання немає, то джерело енергії називають лазером безперервної дії.

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

Найбільше застосування знаходять молекулярні газорозрядні лазери на вуглекислому газі в режимі замкнутого газового циклу. Робоче середовище являє собою різні суміші з вуглекислим газом, наприклад суміш гелій-азот-вуглекислий газ у співвідношенні 20:20:1. Енергетичну схему такого газового лазера показано на рис. 3.22.

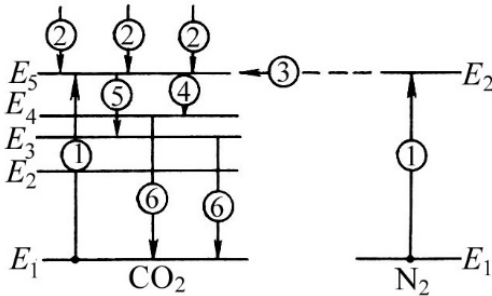


Рис. 3.22. Коливальні енергетичні рівні молекул вуглекислого газу та азоту

Енергетичні коливальні рівні  $E_5$  молекул вуглекислого газу та  $E_2$  молекул азоту збігаються. Індуктоване випромінювання в лазері на  $\text{CO}_2$  викликане переходами  $E_5 \rightarrow E_4$  (4) і  $E_5 \rightarrow E_3$  (5). Більш інтенсивним є перший перехід з довжиною хвилі випромінювання  $10,6 \cdot 10^{-7}$  м ( $10600 \text{ \AA}$ ), який може майже повністю припинити лазерну генерацію в переході  $E_5 \rightarrow E_3$  на довжині хвилі  $9,6 \cdot 10^{-7}$  м ( $9600 \text{ \AA}$ ). Переходи  $E_4 \rightarrow E_1$  та  $E_5 \rightarrow E_1$ , що позначені цифрою 6, відбуваються спонтанно.

Заселення рівня  $E_5$  молекул вуглекислого газу в тліючому розряді відбувається внаслідок трьох основних процесів. Перший з них – збудження молекул  $\text{CO}_2$  до рівня  $E_5$  при їхньому зіткненні зі швидкими електронами (1). Другий механізм заселення рівня  $E_5$  молекули  $\text{CO}_2$  полягає в тому, що здійснюються каскадні переходи (2) на цей рівень молекули, збудженої за рахунок зіткнень з електронами і переходу її на більш високі енергетичні рівні, які не показані на рис. 3.22. Третій процес – резонансна передача (3) збудження молекулам  $\text{CO}_2$  від молекул азоту, які інтенсивно збуджуються в газовому розряді до рівня  $E_2$ , що збігається з рівнем  $E_5$  молекул вуглекислого газу. Заселеність рівня  $E_5$  за рахунок цього значно зростає. Гелій, який має велику теплопровідність, вводиться в робочу суміш для зменшення її температури, що збільшує інверсну заселеність рівня  $E_5$ .

Лазерне випромінювання є когерентним, монохроматичним, легко концентрується. Характер його взаємодії залежить, у першу чергу, від густини потужності ( $\text{Вт/см}^2$ ) в зоні обробки, що визначається відношенням потужності лазерного випромінювання до площі плями, сфокусованої на поверхні матеріалу. Залежно від густини потужності променя відбувається нагрівання твердого металу, плавлення або випаровування,

тобто лазерний промінь можна використовувати для термічної обробки, зварювання або руйнування матеріалу (різання, пробивання отворів тощо). Існує поняття порогової густини потужності  $E^*$ , що визначає умову нагрівання матеріалу без руйнування. Для більшості металів зварювання ведуть при  $E^* < (10^5 \dots 10^7) \text{ Вт/см}^2$ .

### 3.2.2. Технологія лазерного зварювання

Лазерне зварювання (*laserschweissen, laserstrahlschweissen; laser welding, laser beam welding; лазерная сварка*) – зварювання, під час якого нагрівання та плавлення крайок з'єднуваних деталей здійснюють монохроматичним, когерентним променем.

При зварюванні з глибоким проплавленням лазерне зварювання (ЛЗ) має багато спільного з ЕПЗ. Перш за все це "ножове" формування металу шва з малою шириною та великою глибиною, що обумовлено високою концентрацією енергії в зоні зварювання. Розподіл енергії лазерного випромінювання при стабільному режимі лазерного зварювання з глибоким проплавленням показано на рис. 3.23 [14].

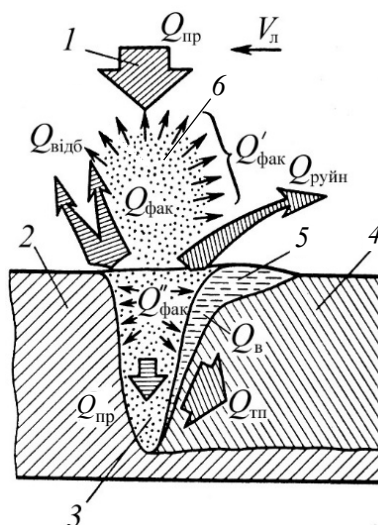


Рис. 3.23. Схема енерговитрат при стабільному режимі проплавлення металу сфокусованим лазерним променем:

- 1 – лазерний промінь; 2 – основний метал;
- 3 – кратер (парогозовий канал); 4 – зварний шов;
- 5 – розплавлений метал; 6 – плазмовий факел

На рис. 3.23 показано всі теплові потоки, що складають тепловий баланс при лазерному зварюванні, де  $Q_{\text{пр}}$  – енергія лазерного променя;  $Q_{\text{фак}}$  – енергія, яка поглинається в об'ємі плазмово-парового факела в кратері та над ним;  $Q_{\text{відб}}$  – енергія, яка відбивається від плоскої поверхні основного металу і дна кратера;  $Q_{\text{руйн}}$  – енергія продуктів руйнування;  $Q'_{\text{пр}}$  – енергія, яка поглинається стінками кратера в процесі їх фотонно-електронного бомбардування;  $Q'_{\text{фак}}$  – енергія, яка розсіюється з факела



### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

в навколишнє середовище;  $Q'_{\text{фак}}$  – частина енергії факела  $Q_{\text{фак}}$ , яка поглинається стінками каналу за рахунок випромінювання і конвекції;  $Q_{\text{в}}$  – повний тепловміст розплавленого металу зварювальної ванни;  $Q_{\text{тп}}$  – енергія, яка відводиться вглиб основного металу і шва за рахунок теплопровідності;  $V_{\text{д}}$  – напрям зварювання.

Енергія, що поглинається стінками кратера, визначається як енергія променя  $Q_{\text{пр}}$  мінус втрати в об'ємі плазмово-парового факела і винесеної з продуктами руйнування металу та відбитої енергії та знаходиться за рівнянням

$$Q'_{\text{пр}} = (Q_{\text{фак}} + Q_{\text{відб}} + Q_{\text{руйн}}), \quad (3.24)$$

де 
$$Q_{\text{фак}} = Q'_{\text{фак}} + Q''_{\text{фак}}. \quad (3.25)$$

Енергія, отримана від променя і факела, іде на нагрівання зварювальної ванни  $Q_{\text{в}}$  та основного металу  $Q_{\text{тп}}$  і знаходиться за рівнянням

$$Q'_{\text{пр}} + Q''_{\text{фак}} = Q_{\text{в}} + Q_{\text{тп}}. \quad (3.26)$$

Наближено тепловий баланс розглядається у вигляді рівняння [65]

$$Q_{\text{пр}} = Q_{\text{фак}} + Q_{\text{відб}} + Q_{\text{руйн}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{тп}}. \quad (3.27)$$

Тоді знаходять ККД:

ефективний

$$\eta_{\text{еф}} = \frac{Q_{\text{в}} + Q_{\text{тп}}}{Q_{\text{пр}}} = \frac{Q_{\text{пр}} - (Q_{\text{фак}} + Q_{\text{відб}} + Q_{\text{руйн}})}{Q_{\text{пр}}}, \quad (3.28)$$

термічний

$$\eta_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{в}}}{Q_{\text{в}} + Q_{\text{тп}}}; \quad (3.29)$$

повний (ККД проплавлення)

$$\eta_{\text{пр}} = \eta_{\text{еф}} \eta_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{в}}}{Q_{\text{пр}}}. \quad (3.30)$$

Ефективність передачі енергії лазерного променя металу характеризується коефіцієнтом поглинання, який наближено можна визначити рівнянням

### 3. 2. Лазерне зварювання та різання

$$A_{\text{еф}} = \frac{Q'_{\text{пр}} + Q''_{\text{ф}}}{Q_{\text{пр}}} = \frac{Q_{\text{в}} + Q_{\text{тп}}}{Q_{\text{пр}}}. \quad (3.31)$$

Коефіцієнт поглинання за фізичною суттю збігається з ефективним ККД, що визначається за рівнянням (3.5).

Ефективний ККД ЛЗ залежить від умов та параметрів режиму. Вплив швидкості зварювання на  $\eta_{\text{еф}}$  показано на рис. 3.24 [14]. Вплив стану поверхонь на ККД  $\eta_{\text{еф}}$  є незначним. Термічний ЛЗ визначається за рівнянням (3.6), як і при ЕПЗ.

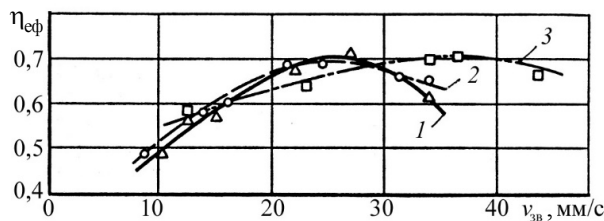


Рис. 3.24. Залежність ефективного ККД від швидкості ЛЗ та стану поверхні сталі Ст3 товщиною 3,5 мм при потужності променя 5 кВт і фокусній відстані 215 мм:

1 – після механічної обробки; 2 – у стані поставки; 3 – після хімічного травлення

На ефективний ККД впливають умови фокусування променя відносно поверхні, як показано для низьковуглецевої сталі на рис. 3.25 [3].

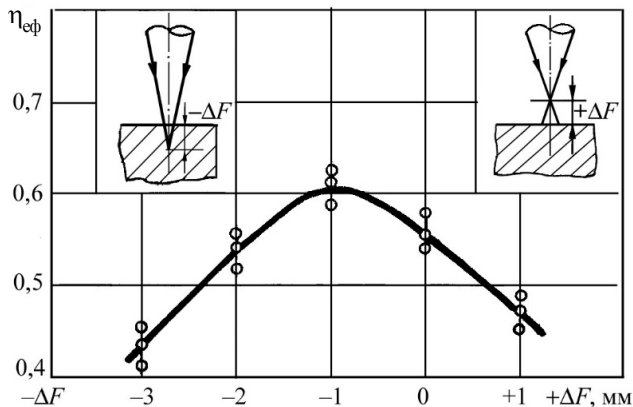


Рис. 3.25. Залежність ефективного ККД від умов фокусування променя при ЛЗ:  
 $P = 5$  кВт;  $v_{\text{зв}} = 16 \dots 20$  мм/с; фокусна відстань  $l_{\text{ф}} = 210$  мм

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

Максимальне поглинання випромінювання відбувається при заглибленні фокальної площини під поверхню виробу. Встановлено, що величина заглиблення залежить від параметрів системи. При використанні довгофокусних систем проплавлення металу зростає, але максимальне заглиблення обмежується товщиною металу [3].

Лазерний промінь є найбільш концентрованим джерелом теплоти, і частка теплоти, яка відводиться в основний метал, мала. Процес зварювання безперервним випромінюванням максимально наближається до моделі нагрівання пластин швидкопереміщуваним лінійним тепловим джерелом. Тому його термічний ККД наближається до теоретичного значення ( $\eta_{т(теор)} = 0,484$ ).

Повний ККД (ККД проплавлення) залежить від потужності випромінювання та певною мірою від швидкості зварювання (рис. 3.26 і 3.27) [3].

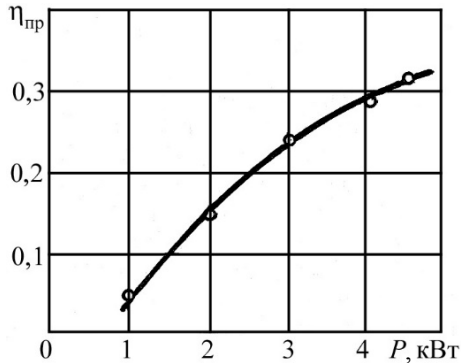


Рис. 3.26. Залежність повного ККД від потужності лазерного променя при нескрізному проплавленні нержавіючої сталі в атмосфері гелію при швидкості зварювання 100 м/год

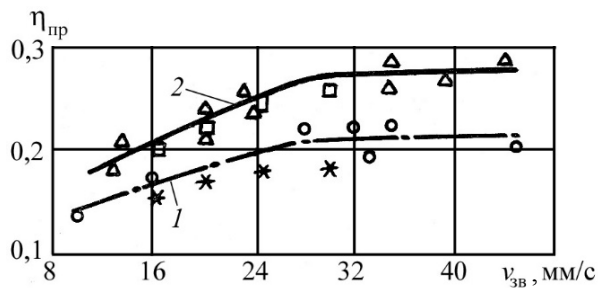


Рис. 3.27. Залежність  $\eta_{пр}$  від швидкості зварювання в атмосфері гелію при  $P = 3 \dots 5$  кВт;  
1 – титанові сплави (● – ВТ-28, \* – ПТ-3В); 2 – сталі (Δ – СтЗ; □ – 0Х18Н10Т)

Збільшення  $\eta_{пр}$  при зростанні потужності випромінювання пояснюється заглибленням парогазового каналу і зменшенням втрат унаслідок відбиття енергії променя. Подібний характер впливу потужності лазера на ККД проплавлення зберігається в різних газових середовищах (He, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Ar), але максимальне значення  $\eta_{пр}$  спостерігається в середовищі He, а мінімальне – в середовищі Ar. На  $\eta_{пр}$  негативно впливає факел плазми,

### 3. 2. Лазерне зварювання та різання

що утворюється над парогазовим каналом унаслідок поглинання ним частини енергії та погіршення фокусування променя. Тому рекомендується застосовувати гази, які зменшують ступінь іонізації, або здувати факел потоком інертного газу, що підвищує ефективність дії випромінювання.

Ефективність процесу ЛЗ променем потужного  $\text{CO}_2$ -лазера зростає при збільшенні швидкості зварювання до 28...30 мм/с (100...108 м/год), а потім стабілізується. Це пояснюється зменшенням втрат енергії за рахунок теплопровідності [3].

Найбільш ефективне проплавлення металу відбувається при відхиленні променя, як показано на рис. 3.28 [3].

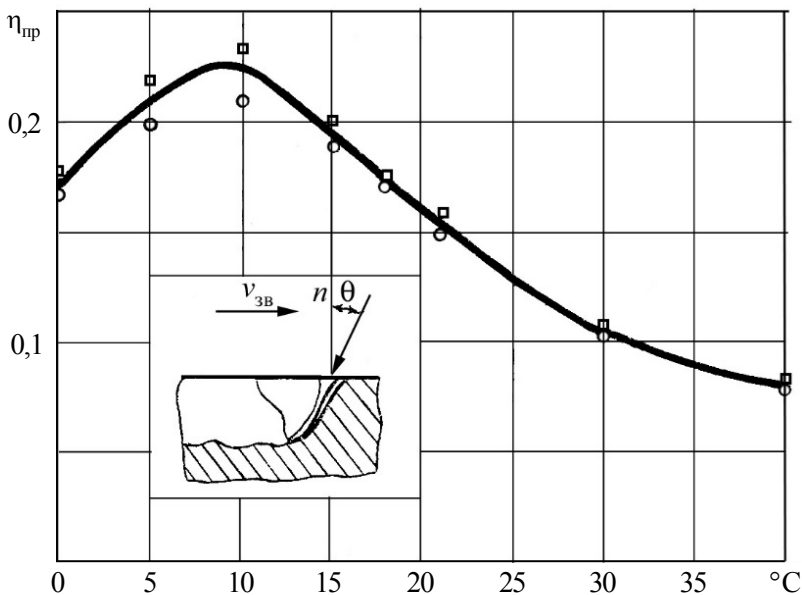


Рис. 3.28. Залежність ККД проплавлення від кута відхилення лазерного променя:  $P = 4$  кВт;  $v_{зв} = 20$  мм/с (72 м/год); фокусна відстань  $l_{ф} = 300$  мм;  $\circ$  – титановий сплав ПТ-3В;  $\square$  – нержавіюча сталь 0Х18Н10Т

Вплив відхилення променя пояснюється зменшенням екрануючої дії парогазового факела, більш рівномірним розподілом енергії променя в каналі зварювальної ванни та зменшенням впливу відбитого випромінювання на роботу квантового генератора. Оптимальний кут відхилення променя сумірний з кутом сходження лазерного променя після фокусувальної лінзи.

Особливістю лазерного зварювання є широкий діапазон зміни режимів, що дозволяє з'єднувати різні метали товщиною від декількох мікрометрів до десятків міліметрів з різними механізмами проплавлення. Зварювання

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

малих товщин до 1,0 мм може проводитися в безперервному або імпульсному режимах випромінювання. Використовують як газові, так і твердотільні лазери потужністю випромінювання в безперервному режимі до 1,0 кВт. Імпульсний режим забезпечується звичайно твердотільними лазерами з енергією випромінювання до десятків джоулів. Матеріали малих товщин зварюють безперервними швами або точками.

За *енергетичними характеристиками* способи зварювання поділяють на три групи [14]. Перша група – густина потужності  $E = 10^5 \dots 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> і час дії  $t > 10^{-2}$  с; друга –  $E = 10^6 \dots 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>,  $t < 10^{-3}$  с; третя –  $E = 10^5 \dots 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>,  $10^{-3} < t < 10^{-2}$  с.

До *першої* групи способів належить зварювання з безперервним випромінюванням лазера з різними довжинами хвиль. Тривалість дії  $t$  визначається відношенням діаметра сфокусованого променя  $d$  до швидкості зварювання  $v_{зв}$ :  $t = d/v_{зв}$ . Способи ЛЗ цієї групи застосовуються як для малих, так і для великих товщин шляхом зміни густини потужності та часу дії випромінювання.

До *другої* групи способів належить зварювання з імпульсно-періодичними режимами. Поєднання високої густини потужності з імпульсністю багаторазової дії променя дозволяє вести зварювання металів та сплавів різних товщин при менших витратах енергії, ніж при безперервному випромінюванні. Частота імпульсів складає десятки та сотні герц, а тривалість їх дії менша, ніж при способах першої групи. Способи другої групи застосовують лише для зварювання з великою глибиною проплавлення.

До *третьої* групи способів належить зварювання, при якому утворення з'єднання визначається часом дії імпульсу з утворенням точки розплаву. Поєднання густини потужності і часу дії імпульсу дає можливість зварювати лише малі товщини.

*Зварювання з глибоким проплавленням* при безперервному випромінюванні виконується зі швидкостями 108...144 м/год потужними газовими лазерами. Зварювання звичайно ведеться без присадного матеріалу і лише в автоматичному режимі. *Зварювання в імпульсно-періодичному режимі* відзначається більш високою енергетичною ефективністю проплавлення, але швидкість зварювання значно менша.

При необхідності можна виконувати ЛЗ з присадним матеріалом, який повинен подаватися точно в зону зварювання та мати діаметр не більше 1,0 мм незалежно від товщини деталей.

Лазерне зварювання *малих товщин* може виконуватися як в імпульсному, так і в безперервному режимах. Найбільш поширене імпульсне

зварювання. При ЛЗ малих товщин застосовують автоматичне і ручне зварювання.

Основними параметрами імпульсного ЛЗ є енергія імпульсу, тривалість імпульсу, діаметр сфокусованого променя, положення фокуса відносно поверхні виробу, швидкість зварювання і частота імпульсів. Крім того, слід вибирати захисне середовище, враховувати підготовку поверхні та необхідність присадки [14].

Енергію імпульсу  $E$ , необхідну для розплавлення металу без випліскування, орієнтовно знаходять за формулою

$$E = \frac{0,885 T_{пл} \lambda t \pi r^2}{\sqrt{at}} \text{ Дж}, \quad (3.32)$$

де  $t$  – тривалість імпульсу;  $r$  – радіус сфокусованого променя;  $a$  – коефіцієнт температуропровідності.

Тривалість імпульсів для сталі дорівнює  $5 \cdot 10^{-3} \dots 8 \cdot 10^{-3}$ , для міді –  $10^{-4} \dots 5 \cdot 10^{-4}$ , для алюмінію –  $5 \cdot 10^{-4} \dots 2 \cdot 10^{-3}$  с. Більш точні значення знаходять експериментально.

Діаметр сфокусованого променя визначають у діапазоні 0,05...1,00 мм. Фокусну відстань лінзи вибирають у діапазоні 30...100 мм. Діаметр сфокусованого променя пов'язаний з густиною потужності  $P_F$  рівнянням

$$P_F = \frac{4E}{\pi d^2 t}. \quad (3.33)$$

Швидкість шовного зварювання визначають за формулою

$$v_{зв} = df(1 - k), \quad (3.34)$$

де  $f$  – частота імпульсів;  $k$  – коефіцієнт перекриття точок, що знаходиться в діапазоні 0,3...0,9. Для вакуумних швів він повинен бути не меншим 0,5. Частота імпульсів у твердотільних лазерів до 20 Гц дозволяє вести шовне зварювання зі швидкістю до 18 м/год.

Деякі типи зварних з'єднань тонких металів показано на рис. 3.29 [14].

Основними параметрами режимів ЛЗ з глибоким проплавленням є потужність випромінювання, швидкість зварювання, параметри фокусуєчої системи. Інші фактори впливу: захисна атмосфера, підготовка деталей, параметри, що підвищують ефективність проплавлення.

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

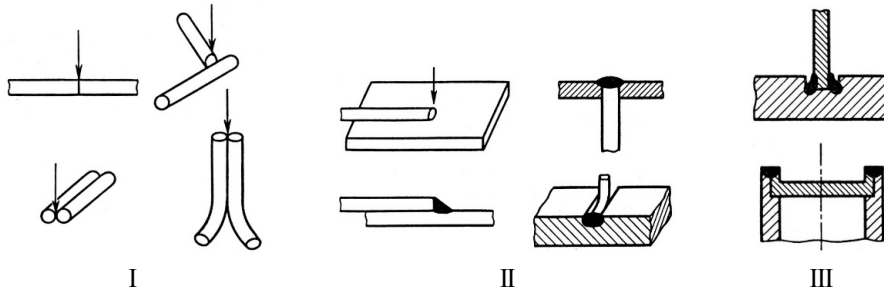


Рис. 3.29. Деякі типи зварних з'єднань тонких металів:  
 I – зварювання дротиків; II – зварювання дротиків з масивними деталями;  
 III – зварювання деталей з відбортовкою

Оптимальним діапазоном діаметрів сфокусованого променя є 0,5...1,0 мм. Фокусна відстань лінз знаходиться в діапазоні 100...250 мм. Проплавлення залежить від положення фокуса променя відносно поверхні виробу (рис. 3.30). Знак мінус відповідає заглибленню фокуса в метал.

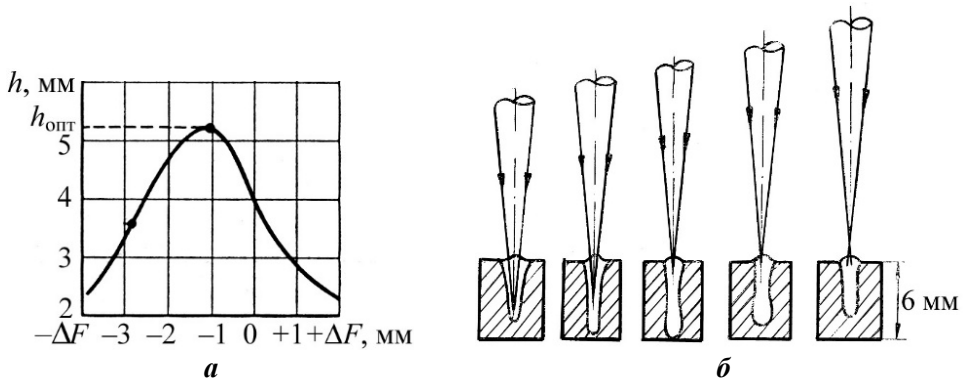


Рис. 3.30. Залежність глибини проплавлення від положення фокальної площини відносно поверхні виробу (а) та схематичне зображення впливу положення фокальної площини на глибину проплавлення нержавіючої сталі при  $P = 16$  кВт,  $v_{зв} = 300$  м/год (б)

Залежність глибини проплавлення від швидкості зварювання і потужності лазерного променя  $CO_2$ -лазера показано на рис. 3.31 [3]. Для порівняння показано також аналогічні залежності для ЕПЗ. Видно, що ЛЗ за ефективністю проплавлення займає проміжне місце між ЕПЗ у вакуумі та в атмосфері.

### 3. 2. Лазерне зварювання та різання

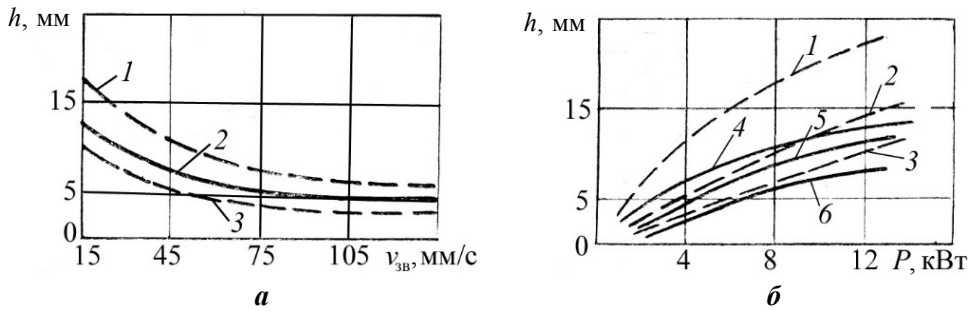


Рис. 3.31. Вплив швидкості зварювання (а) та потужності променя (б) на глибину нержавіючої сталі при ЛЗ та ЕПЗ:

1 – ЕПЗ,  $P = 10$  кВт; 2 – ЛЗ, 10 кВт; 3 – ЕПЗ в атмосфері, 12 кВт (а); 1 – ЕПЗ,  $v_{зв} = 16$  мм/с; 2 – ЕПЗ, 41,7 мм/с; 3 – ЕПЗ, 83,8 мм/с; 4 – ЛЗ, 16,7 мм/с; 5 – ЛЗ, 41,7 мм/с; 6 – ЛЗ, 83,8 мм/с (б)

Потужність випромінювання та швидкість зварювання перш за все впливають на проплавлення металу, формування та геометрію шва. При середніх значеннях потужності випромінювання і значних швидкостях зварювання (близько 100 м/год) глибина проплавлення  $h$  збільшується пропорційно потужності  $P$ , а при зменшенні швидкості – за рівнянням [14]

$$h \approx \alpha P^{0,7}, \quad (3.35)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт пропорційності.

Взаємозв'язок основних параметрів режиму зварювання описується рівнянням

$$h = \frac{P}{2\pi\lambda T_k} \ln \frac{r + a/v_{зв}}{r}, \quad (3.36)$$

де  $T_k$  – температура кипіння металу;  $r$  – радіус сфокусованого променя.

Збільшити глибину проплавлення можна введенням у зону зварювання елементів, які знижують ступінь іонізації та екрануючу дію факела. Такими елементами можуть бути деіонізатори – фтор та хлор.

Ефективність проплавлення металу в газовій суміші показано на рис. 3.32 [3]. Максимальне значення  $\eta_{пр}$  забезпечує гелій.

При зварюванні нержавіючої сталі лазерним променем потужністю 20 кВт при швидкості 42 мм/с у середовищі гелію глибина шва складає 12,7 мм, ширина – 1,6 мм, а при зварюванні на повітрі глибина зменшується до 3,0 мм, ширина збільшується до 12,6 мм [3]. Гелій різко підвищує ефективність проплавлення і є надійним захисним середовищем, але він значно дорожчий від інших газів. Оскільки в середовищі аргону глибина проплавлення мала, то при ЛЗ використовують суміш аргону і гелію.



### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

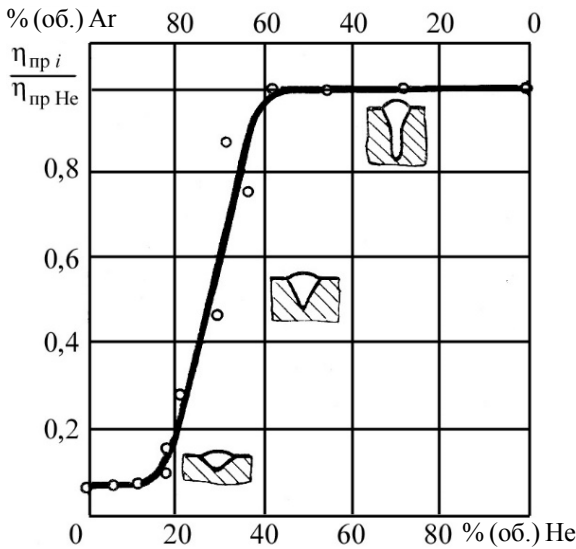


Рис. 3.32. Вплив складу аргонгелієвої суміші на співвідношення коефіцієнтів проплавлення металу в газовій суміші  $\eta_{пр i}$  та чистому гелії  $\eta_{пр He}$  лазерним променем потужністю  $P = 5$  кВт при  $v_{зв} = 20$  мм/с,  $l_{\phi} = 210$  мм

При вмісті в суміші 40...50% гелію ефективність проплавлення така ж, як і в чистому гелії (див. рис. 3.32), але суміш краще утримується над зварним швом унаслідок збільшення її густини. Ефективність проплавлення залежить також від напрямку газового струменя та витрат газу. Вакуум підвищує ефективність проплавлення.

Ефективність проплавлення різко зростає (у 3–4 рази) при використанні імпульсно-періодичного режиму ЛЗ. Періодична зупинка лазерного випромінювання для розсіювання пароплазмової фази в паузі між імпульсами є найбільш раціональним способом боротьби з розвитком плазмового факела [3]. Вплив швидкості зварювання на залежність відношення глибини проплавлення до середньої потужності променя при імпульсно-періодичному та безперервному випромінюванні показано на рис. 3.33.

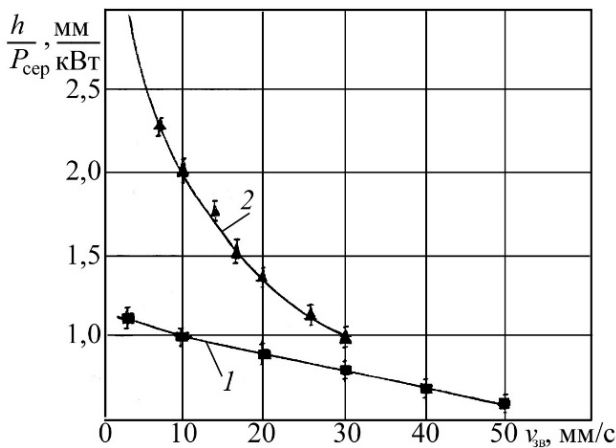


Рис. 3.33. Залежність ефективності проплавлення від швидкості ЛЗ при безперервному (крива 1) та імпульсно-періодичному (крива 2) режимах (частота імпульсів  $f = 300$  Гц, середня потужність  $P_{ср} = 3...5$  кВт, шпаруватість  $G = 4$ )

### 3. 2. Лазерне зварювання та різання

Аналіз результатів досліджень показує, що ефективність імпульсно-періодичного режиму (ІПР) при швидкостях, більших ніж 15...20 мм/с, різко падає, тобто ІПР є ефективним при малих швидкостях зварювання і глибокому проплавленні.

Суттєве збільшення глибини проплавлення при ІПР досягається за рахунок збільшення інтенсивності лазерного випромінювання, однак при інтенсивності, вищій від певного порогового значення, утворюється плазма в парах металу. Це призводить до збільшення тиску парогазової суміші та випліскування металу. Для попередження випліскування розплаву та якісного формування шва необхідно, щоб тиск на передню стінку парогазового каналу не перевищував 12 атм (за експериментальними даними). Відповідно максимальна інтенсивність випромінювання  $I$  не повинна бути більшою  $(1...2) \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Для цього рівня інтенсивності оптимальна тривалість імпульсу, що необхідна для розігрівання металу від температури плавлення  $T_{\text{пл}}$  до температури кипіння  $T_{\text{кип}}$ , оцінюється рівнянням [3]

$$t_{\text{опт}} \approx 4a \left( \frac{\rho [c(T_{\text{кип}} - T_{\text{пл}}) + H_{\text{пл}}]}{\vec{A}I} \right)^2, \quad (3.37)$$

де  $\rho$ ,  $a$ ,  $c$ ,  $H_{\text{пл}}$ ,  $\vec{A}$  – відповідно густина, температуропровідність, питома теплоємність, питома теплота плавлення, середній коефіцієнт поглинання світла в інтервалі  $T_{\text{пл}} - T_{\text{кип}}$ .

При ЛЗ з глибоким проплавленням необхідно забезпечувати газовий захист металу. Типи з'єднань та підготовку деталей при ЛЗ доцільно застосовувати ті ж самі, що і при ЕПЗ. Для визначення параметрів режиму ЛЗ можна використовувати інженерну методику, викладену в роботі [3]. Запропоновані в ній рівняння дозволяють оцінити основні параметри режимів ЛЗ різних металів.

Лазерне зварювання жароміцних сплавів досліджено в роботі [39] на установці ЛТ1-2М (лазер на CO<sub>2</sub>) при виводі лазерного променя в атмосферу та захисті металу шва гелієм. Макрошліф металу в зоні проплавлення показано на рис. 3.34, а параметри проплавлення наведено в табл. 3.3, в якій для порівняння є також дані для низьколегованої сталі.

Незважаючи на різні умови проплавлення сплаву ЭП99 і сталі, з табл. 3.3 видно, що на 1 мм глибини проплавлення металу необхідно 0,9...1,6 кВт потужності залежно від параметрів режиму.

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

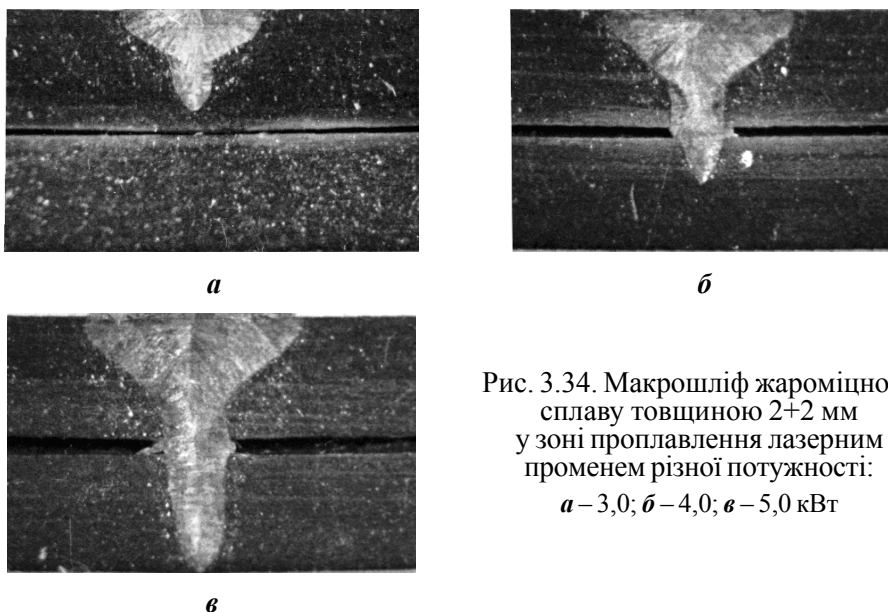


Рис. 3.34. Макрошліф жароміцного сплаву товщиною 2+2 мм у зоні проплавлення лазерним променем різної потужності:  
*a* – 3,0; *б* – 4,0; *в* – 5,0 кВт

Таблиця 3.3. Параметри проплавлення металу лазерним променем

Метал	Середня потужність променя $P_{\text{сер}}$ , кВт	Швидкість зварювання $v_{\text{зв}}$ , м/год	Глибина проплавлення $h$ , мм	Ширина проплавлення $B$ , мм	$\frac{B}{h}$	$\frac{P_{\text{сер}}}{h}$
	Жароміцний нікелевий сплав	3,0	62	1,0	2,5	1,30
4,0		62	3,0	3,4	1,10	1,35
5,0		62	4,0	3,9	0,97	1,25
Низьколегована сталь	8,0	45	8,9	2,3	0,26	0,90
	8,0	60	6,4	2,1	0,33	1,25
	20,0	76	20,2	3,3	0,16	1,00
	20,0	153	12,7	2,3	0,18	1,57

Мікроструктуру зварного з'єднання сплаву ЭИ602 (ХН75МВТЮ) показано на рис. 3.35.

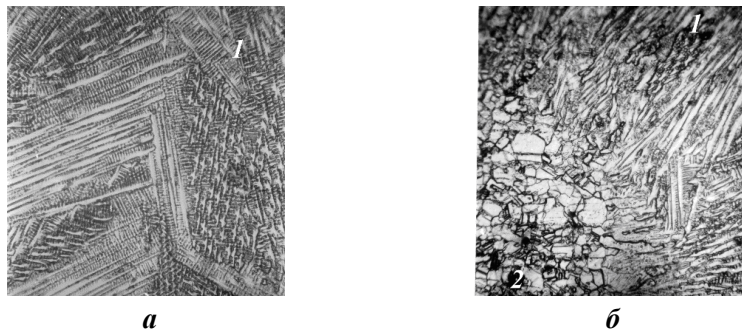


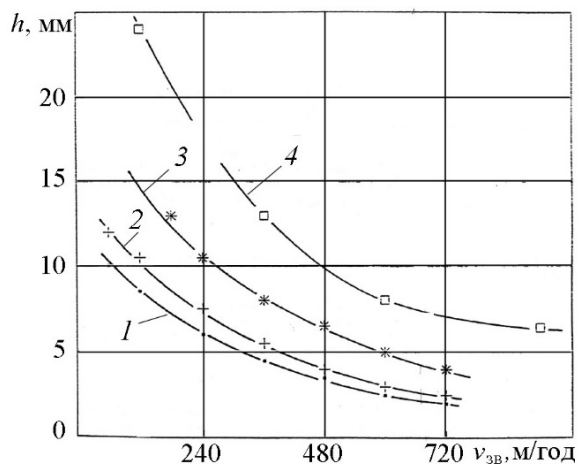
Рис. 3.35. Мікроструктура металу шва (*a*,  $\times 300$ ) і зони сплавлення (*б*,  $\times 100$ ) при ЛЗ

### 3. 2. Лазерне зварювання та різання

Проплавлення жароміцного сплаву має грибоподібну форму (див. рис. 3.34). Зона термічного впливу (див. рис. 3.35,б) практично відсутня. Біля поверхні проплавлення істотної зміни зерен основного металу не спостерігається. Мікроструктура з'єднань при ЛЗ аналогічна мікроструктурі при ЕПЗ. Механічні випробування зварних з'єднань на короткочасну та тривалу міцність при 900 °С показали, що ці показники знаходяться на рівні показників основного металу.

Взаємозв'язок між потужністю лазерного променя, швидкістю зварювання та глибиною проплавлення низьковуглецевої сталі в режимі безперервного випромінювання показано на рис. 3.36 [14].

Рис. 3.36. Вплив швидкості зварювання в гелії на глибину проплавлення сталі при різних потужностях лазерного променя:  
1–7,5; 2–12,5; 3–18,0; 4–25,0 кВт;  
фокусна відстань 300 мм



Залежності, зображені на рис. 3.36, охоплюють широкий інтервал зміни потужності променя та швидкості зварювання. Практично використовуються значно менші інтервали швидкостей зварювання. Рекомендовані параметри безперервного режиму ЛЗ, що забезпечують найкращі геометрію шва, механічні властивості та технологічну міцність з'єднань деяких матеріалів, наведено в табл. 3.4 [14].

Таблиця 3.4. Режими лазерного зварювання деяких металів при безперервному випромінюванні

Метал	Товщина, мм	Потужність променя, кВт	Швидкість зварювання, м/год	Фокусна відстань, мм	Заглиблення фокуса, мм
Низьковуглецеві та низьколеговані сталі (Ст3, 17ГС)	3,0	3,1	110	120	1,5
Середньовуглецеві леговані сталі (35, 30ХГСА)	2,0	2,8	100	120	1,5
	3,0	3,2	100	120	1,5

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

Продовж. табл. 3.4

Метал	Товщина, мм	Потужність променя, кВт	Швидкість зварювання, м/год	Фокусна відстань, мм	Заглиблення фокуса, мм
Високолеговані аустенітні сталі (12X18H10T)	3,0	3,3	100	160	1,0
	5,0	5,0	75	150	1,0
Високолеговані мартенситно- старіючі сталі (08X15H5Д2Т)	2,0	2,5	100	160	1,0
	3,0	3,5	80	500	1,5
Алюмінієво-магні- євий сплав АМг61	2,0	2,3	100	120	–
	4,0	2,8	90	120	–
Титановий сплав BT6	3,0	3,0	80	300	+1,0
	5,0	4,0	80	300	+1,0
Титановий сплав BT28	2,0	4,0	160	230	-1,0
	3,0	3,3	100	149	-1,0

#### 3.2.3. Технологія лазерного різання

Під дією лазерного променя можливі два механізми руйнування металу – плавлення та випаровування. Поверхня руйнування існує по всій товщині металу і рухається за напрямком різання.

Різання з випаровуванням металу (**лазерне різання – ЛР**) вимагає високих енергозатрат і потужних лазерів, оскільки необхідне нагрівання матеріалів до температур кипіння, які значно перевищують температуру плавлення. Механізм випаровування застосовують за необхідності пробивання в матеріалах отворів малого діаметра стаціонарним променем, наприклад для виготовлення пористого матеріалу.

Енергетично більш вигідним є механізм плавлення металів у зоні різання та видалення з каналу різання продуктів руйнування за допомогою динамічної дії газів. Таке різання називають **газолазерним (ГЛР)**.

При ГЛР сталей і сплавів як допоміжний газ застосовують кисень, який виконує три функції [13]:

- оксиди сприяють зменшенню відбивання світла від поверхні металу;
- теплота екзотермічної реакції горіння підсилює термічну дію променя;
- струмінь кисню виносить із зони ГЛР розплавлений метал та продукти згорання, забезпечуючи приплив кисню безпосередньо до фронту реакції. Остання функція сприяє утворенню чистого, якісного розрізу значно більшої глибини, ніж при відсутності кисню. Принципову схему ГЛР показано на рис. 3.37.

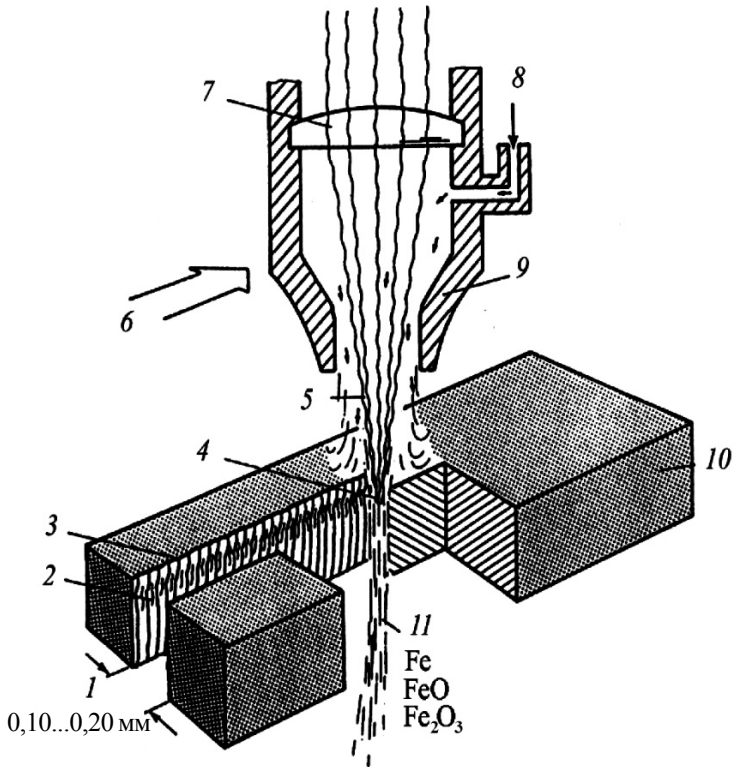


Рис. 3.37. Принципова схема ГЛР:

- 1 – ширина розрізу; 2 – оксидна плівка; 3 – плівка закристалізованого металу;  
 4 – фокус лазерного променя; 5 – струмінь кисню для різання; 6 – напрям різання;  
 7 – фокусувальна лінза; 8 – подача кисню; 9 – сопло; 10 – основний метал;  
 11 – шлаковий струмінь

При ГЛР залежно від кількості теплоти екзотермічної реакції окиснювання виділяють два механізми. Перший механізм, характерний для металів, які загоряються нижче від температури плавлення та інтенсивно згоряють (низько- і середньовуглецеві сталі, титан, його сплави) з великим тепловим ефектом. При цьому внесок теплоти реакції горіння металу в загальний тепловий баланс значний. В останньому випадку метал горить за рахунок теплоти реакції металу з киснем по всій поверхні контакту зі струменем кисню.

Другий механізм полягає в тому, що матеріал не горить, а плавиться; газовий струмінь видаляє розплав із зони різання. Цей механізм характерний для високовуглецевих та легованих сталей, міді тощо, в яких тепловий ефект горіння малий. При цьому механізмі можна використовувати струмінь повітря, аргону тощо.

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

Існують різні схеми подачі газу в зону різання. Деякі з них показано на рис. 3.38.

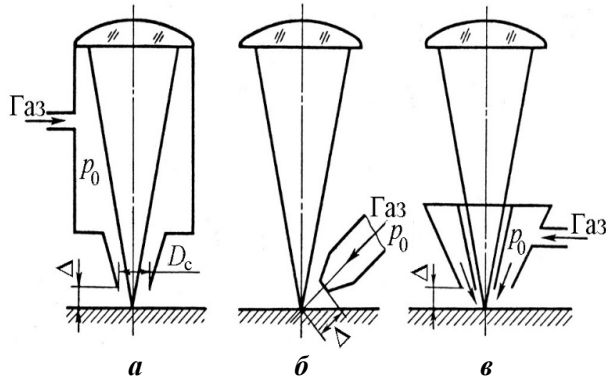


Рис. 3.38. Схеми подачі допоміжного газу в зону різання:  
*a* – співвісна з променем; *б* – бокова; *в* – кільцева ( $p_0$  – тиск газу;  
 $D_c$  – діаметр сопла;  $\Delta$  – відстань між соплом і поверхнею металу)

Газодинамічні параметри газового струменя визначаються тиском  $p_0$  газу всередині сопла, властивостями газу, конструкцією сопла, умовами витікання газу із сопла.

Газолазерне різання може виконуватися при безперервному або імпульсно-періодичному випромінюванні. Використання того або іншого випромінювання при різанні має ті ж особливості, що і при зварюванні. Імпульсно-періодичне випромінювання дозволяє зменшити необхідні потужності лазера, але його продуктивність значно нижча, ніж при безперервному випромінюванні. Цим зумовлене широке впровадження у виробництво ГЛР з безперервним випромінюванням. Імпульсні лазери доцільно використовувати для різання кольорових металів з високими теплопровідністю та коефіцієнтом відбивання світла, металів малих товщин з високими вимогами до точності різання.

Основні параметри режимів різання пов'язані з характеристиками випромінювання та аналогічні параметрам режимів зварювання. *Серед основних факторів, які визначають продуктивність і якість різання, слід відзначити потужність і густину потужності випромінювання, швидкість різання, тиск і склад допоміжного газу, відстань від зрізу сопла до поверхні матеріалу та здатність поверхні поглинати випромінювання, вид, склад і властивості матеріалу [13].*

Якість різання визначають наступні показники: точність, шорсткість  $R_z$ , неперпендикулярність (клинуватість)  $j$ , глибина зони термічного впливу  $b_{зТВ}$ , ширина розрізу  $b$ , відставання лінії розрізу, кількість ґрату

### 3. 2. Лазерне зварювання та різання

(напливи на нижній країці металу), радіус оплавлення верхньої крайки  $R$  (рис. 3.39).

Найважливішими параметрами, які визначають розмірні характеристики розрізу, є потужність  $P$ , густина потужності  $P_F$  та швидкість різання  $v_p$ . Зручними для користування є параметри  $P/v_p$  та  $P/h$  ( $h$  – глибина прорізання металу;  $v_p$  – швидкість різання). Взаємозв'язок параметрів режиму різання показано на рис. 3.40–3.42. Вплив швидкості різання на параметр  $P/h$  та ширину розрізу показано на рис. 3.40 [13]. З рис. 3.40,б видно, що ширина розрізу зменшується зі зменшенням діаметра сфокусованого променя. Висока якість поверхні розрізу різних металів забезпечується при певних співвідношеннях між швидкістю різання і густиною потужності випромінювання.

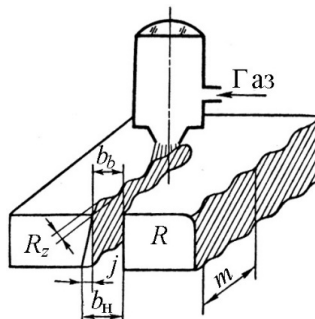


Рис. 3.39. Показники якості різання

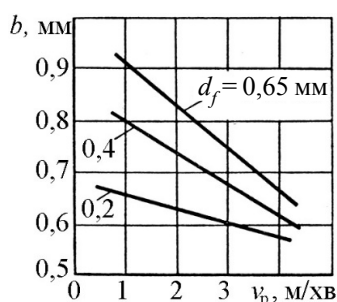
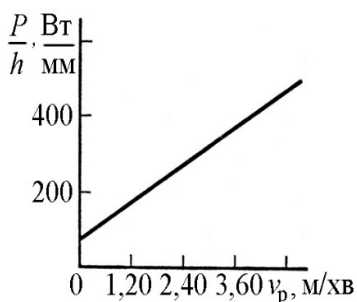


Рис. 3.40. Вплив швидкості різання низьковуглецевої сталі на параметр  $P/h$  (а) та на ширину розрізу (б) при різних діаметрах сфокусованого променя

На поверхні розрізу можна виділити верхню зону високої якості (зона I), де висота шорсткостей при різанні сталей і титану складає 20...30 мкм. Нижче знаходиться зона II з висотою шорсткостей більше 100 мкм, що різко зменшується при збільшенні швидкості різання до 90...120 м/год [13].

Взаємозв'язок швидкості різання, потужності лазерного випромінювання і товщини металу показано на рис. 3.42 [97]. Видно, що ефективність лазерного

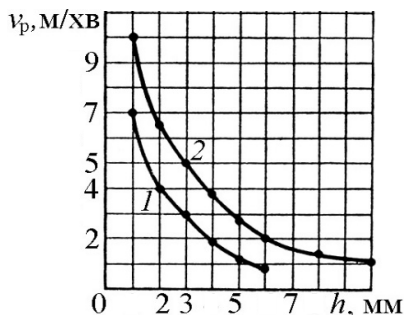


Рис. 3.41. Вплив товщини вуглецевої сталі на максимальну швидкість різання при різних потужностях променя:  
1 – 625; 2 – 1250 Вт



### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

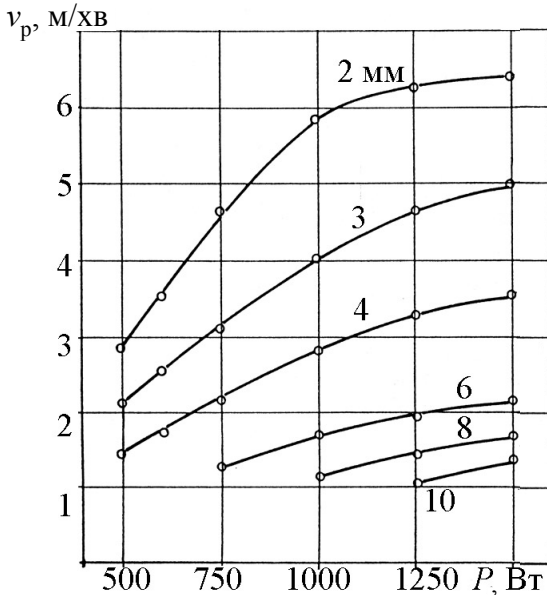


Рис. 3.42. Залежність швидкості різання вуглецевої сталі від потужності лазерного променя при різних товщинах металу

різання при збільшенні товщин металу падає. Тому його звичайно застосовують для товщин до 10...12 мм.

Узагальнюючи результати досліджень максимальної глибини якісного різання, ширини розрізу, розмірів ЗТВ шорсткості поверхні розрізу при безперервному випромінюванні від технологічних факторів для різних металів, у роботі [13] зроблено наступні висновки:

– глибина якісного різання нержавіючих сталей і сплавів титану зростає при збільшенні тиску допоміжного газу, причому при менших тисках вплив більший;

– максимальна глибина різання вуглецевих сталей та сплавів титану зростає з підвищенням потужності випромінювання, тиску допоміжного газу та зменшенням швидкості різання;

– для забезпечення мінімальної ширини розрізу, ЗТВ та шорсткості поверхні розрізу обробку слід проводити на максимально припустимих швидкостях, на яких можливе різання деталей заданої товщини при певних потужності і тиску допоміжного газу;

– для підвищення якості різання тиск допоміжного газу при різанні вуглецевих сталей повинен бути 0,05...0,15 МПа, нержавіючих сталей і титанових сплавів – 0,2...0,3 МПа.

Режими різання деяких матеріалів при діаметрі сфокусованого променя діаметром 0,2 мм наведено в табл. 3.5, а вплив товщини металу на параметри режимів ГЛР – в табл. 3.6.

Перевагами різання лазерним променем, порівняно з іншими способами термічного різання, є:

- можливість обробки різаних матеріалів як металічних, так і неметалічних;
- висока якість та продуктивність різання;
- незначна ЗТВ і мінімальні деформації металу.

### 3. 2. Лазерне зварювання та різання

**Таблиця 3.5. Параметри режимів ГЛР із безперервним випромінюванням деяких металів та показники якості розрізу**

Матеріал	Товщина листа, мм	Потужність лазера, Вт	Швидкість різання, м/хв	Тиск газу, МПа	Показники різання		
					Ширина розрізу, мм	Глибина ЗТВ, мм	Шорсткість, мкм
Вуглецева сталь	1,0 <sup>1)</sup>	500	2,23	0,15	0,64	0,12	14,5
	5,2	1000	1,0	0,15	0,51	0,26	–
	10,0 <sup>1)</sup>	1000	0,37 <sup>2)</sup>	0,15	0,82	0,40	80
Нержавіюча сталь	2,0	1000	3,50	0,25	0,39	0,098	–
	5,0 <sup>1)</sup>	1000	0,91	0,15	0,64	0,270	–
Титан	1,0 <sup>1)</sup>	1000	2,27	0,15	0,340	0,24	16,4
	2,0	1000	2,20	0,15	0,344	–	–
Алюміній	2,0	1000	0,2	0,15	0,377	–	–
	8,0 <sup>3)</sup>	3000	0,6	–	0,500	–	–
Нікель	1,0 <sup>3)</sup>	2000	7,9	–	–	–	–
Молібден	4,0 <sup>3)</sup>	4000	0,5	–	–	–	–

<sup>1)</sup> Діаметр сфокусованого променя 0,4 мм; <sup>2)</sup> режим різання з низькою якістю; <sup>3)</sup> діаметр сфокусованого променя невідомий.

**Таблиця 3.6. Параметри режимів ГЛР сталей і жароміцних сплавів залежно від товщини металу**

Параметри режиму	Товщини, мм вуглецевих сталей								
	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0	12,0
Швидкість різання, м/хв	5,0	4,0	3,2	1,9	1,8	1,0	0,8	0,6	0,4
Потужність лазера при різанні, кВт	0,9	0,9	1,05	1,05	1,2	1,35	1,5	1,8	2,1
Тиск кисню при різанні, МПа/(атм)	3,5 (35)	3,0 (30)	3,0 (30)	2,5 (25)	2,0 (20)	1,5 (15)	1,0 (10)	0,6 (6)	0,4 (4)
	Товщини, мм хромонікелевих сталей і жароміцних нікелевих сплавів								
	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0		
	6,4	4,0	3,2	2,6	2,4	1,4	0,8		
	1,95	1,95	2,4	2,4	2,4	2,4	2,7		
	2,0 (20)	3,0 (30)	4,5 (45)	5,0 (50)	6,0 (60)	8,0 (80)	8,0 (80)		

При різанні алюмінієво-магнієвих сплавів товщиною 1,0...3,0 мм потужність променя дорівнює 2,55 кВт, швидкість різання товщиною 1 мм – 21,8, 2 мм – 2,4 і 3 мм – 2,0 м/хв. Тиск кисню дорівнює 1,0 МПа при товщині металу 1,0...2,0 мм і 1,1 МПа при товщині 3,0 мм. Діаметр

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

сопла при різанні вуглецевих сталей товщиною до 8,0 мм, нержавіючих сталей до 4,0 мм і алюмінієво-магнієвих сплавів до 3,0 мм дорівнює 1,5 мм. При більших товщинах металу діаметр сопла збільшується. Відстань між соплом і поверхнею металу дорівнює 0,7 мм. При вирізанні деталей з кутами повороту лінії різання потужність променя на них зменшується на 10...80 % залежно від конфігурації, товщини та матеріалу деталі.

З підвищенням товщини металу збільшують діаметр сопла, тиск кисню, потужність променя, зменшують швидкість різання.

Мінімальні ширина розрізу, шорсткість поверхні і зона термічного впливу спостерігаються при максимально допустимих швидкостях різання для заданих потужності променя і тиску кисню.

Параметри режиму різання залежать також від конфігурації деталей, траєкторії руху головки та інших факторів, для врахування яких газолазерний комплекс має цілий ряд параметрів, наприклад прискорення на прямих, зміна параметрів різання на кутах траєкторії, холостих переходах, початку різання тощо, які забезпечують високу якість різання.

Одним з основних питань розробки технології лазерного зварювання, різання або іншої обробки матеріалів є вибір лазерного устаткування.

#### *3.2.4. Лазерне устаткування*

Устаткування для лазерної обробки матеріалів складається з технологічного лазера, систем транспортування, відхилення і фокусування променя, транспортування газів, устаткування для закріплення і переміщення деталей, автоматизованої системи кріплення і переміщення деталей, автоматизованої системи контролю та керування параметрами установки і технологічного процесу.

Основним елементом устаткування є технологічний лазер. Для технологічних цілей у промисловості застосовуються головним чином твердотільні, газові та напівпровідникові лазери. Перші технологічні установки було розроблено на основі рубінового лазера. Максимальна енергія випромінювання установок СУ-1, УЛ-2, К-3М – не більше 2 Дж, установки УЛ-20 – 20 Дж. У 1969 р. було створено установку СЛС-10-1 з використанням лазера на неодимовому склі. Енергія випромінювання складала 8 Дж. Для точкового зварювання деталей товщиною до 1 мм було розроблено більш потужні установки "Квант-10" (15 Дж) і "Квант-16" (30 Дж). Скло значно дешевше від рубінових стрижнів, але має низьку теплопровідність, що вимагає зниження частоти імпульсів. Збільшення частоти імпульсів до декількох десятків герц стало можливим при використанні як активної речовини ітрій-алюмінієвого гранату, легovanого неодимом. Такі лазери використано в установках для шовного зварювання з перекриттям точок типу "Квант-12" (3 Дж) і "Квант-17" (4 Дж).

### 3. 2. Лазерне зварювання та різання

Значно потужніші та ефективніші установки виготовлено на основі газових лазерів типу ЛТ1-2М (рис. 3.43).

Для створення в робочому контурі 6 вакууму використовують механічні насоси об'ємної дії, що приєднуються через вакуумний кран 3. Робоча суміш подається в контур через змішувач 4. Прокочування суміші по контуру здійснюється циркуляційним насосом 1. Оскільки інверсна заселеність істотно зменшується при збільшенні температури газу, то для охолодження робоча суміш пропускається через теплообмінник 2. Збудження молекул здійснюється в тліючому розряді, що горить у газорозрядній камері 5.

Тліючий розряд – самостійний розряд при низьких і середніх тисках  $(1,3 \dots 80) \cdot 10^2$  Па, напрузі горіння від 0,2 до 30 кВ і густині струму до  $10^{-3}$  А/мм<sup>2</sup>. Розряд горить між водоохолодними катодною 6 і анодною 5 плитами, встановленими в корпусі 1 камери 2, показаної на рис. 3.44.

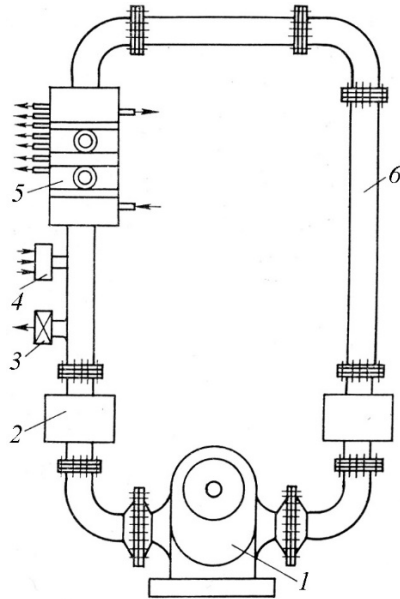


Рис. 3.43. Принципова схема газорозрядної лазерної установки

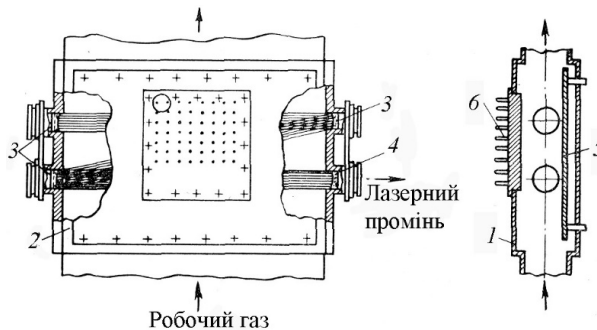


Рис. 3.44. Схема газорозрядної камери газового лазера безперервної дії

Особливістю розряду є великий спад потенціалу (сотні вольт) в прикатодному шарі товщиною 0,2...1,2 мм, що викликає інтенсивне нагрівання катода (деталі). Катод і робоча суміш газів інтенсивно охолоджуються для запобігання переходу тліючого розряду в дуговий, при якому відбувається іонізація молекул замість збудження.

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

Безперервне прокачування газової суміші по робочому контуру і її охолодження збільшують потужність випромінювання. Для посилення і направлення випромінювання служать дзеркала 3 резонатора. Вихідний промінь має форму кільця і після виходу з установки фокусується оптичною системою 4.

Основу установки складає газорозрядний  $\text{CO}_2$ -лазер з великим обсягом активного середовища і високою густиною енергії випромінювання, в якому використовується резонатор Z-подібного типу, що генерує інфрачервоне випромінювання потужністю до 5 кВт у безперервному режимі. Робоча газова суміш складається з азоту, гелію і вуглекислого газу при сумарному тиску  $6,65 \cdot 10^3$  Па. Робоча суміш прокачується через резонатор зі швидкістю 75 м/с, що забезпечує витрати газу  $2,5 \text{ м}^3/\text{с}$ . Оскільки потужність лазера пропорційна числу збуджених молекул газу, то такі параметри прокачування дають можливість одержувати велику потужність лазерного випромінювання у відносно малому об'ємі генерації.

Розряд підтримується постійним струмом при напрузі до 5 кВ. Трипрохідний Z-подібний резонатор має чотири мідних охолоджуваних дзеркала, які за допомогою спеціальної підвіски встановлені в незалежні юстирувальні вузли. Промінь, що має форму кільця з внутрішнім діаметром 35 мм та зовнішнім 45 мм, виходить з резонатора горизонтально і, відбившись від поворотного дзеркала, підводиться до операційної ділянки. Тут промінь через фокусуючу систему направляється на виріб, закріплений на робочому столі. Діаметр фокальної плями може бути зменшений до десятих часток міліметра. Залежно від технологічної операції змінюється потужність променя і може відбуватися нагрівання матеріалу у твердому стані, його плавлення або випаровування. При ГЛР продукти руйнування металу видаляються газовим струменем, що подається в зону різання. Подача кисню посилює руйнування металу реакцією окиснювання.

Керування технологічним процесом та його контроль ведуться комп'ютерними системами. Структурну схему лазерного комплексу показано на рис. 3.45 [13].

Комплекс для лазерного різання складається із чотирьох основних частин: випромінювача **I**, координатного пристрою **II**, системи формування і транспортування променя та газу **III**, автоматизованої системи керування параметрами установки і технологією процесу різання – **IV**. Наприклад, можна назвати устаткування лазерного різання типів *Bystar* та *Byflex*.

### 3. 2. Лазерне зварювання та різання

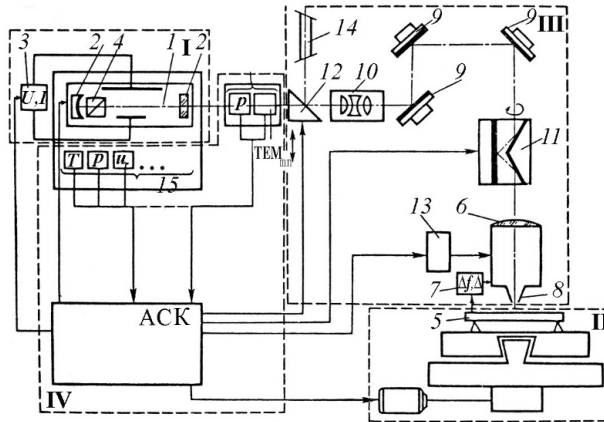


Рис. 3.45. Структурна схема автоматизованого комплексу для лазерного різання:

- I** – випромінювач (1 – активне газове середовище; 2 – дзеркала резонатора; 3 – елементи системи збудження активного середовища; 4 – пристрій модуляції випромінювання); **II** – координатний пристрій (5 – виріб); **III** – система формування та транспортування випромінювання і газу (6 – фокуруюча система; 7 – система стабілізації положення фокальної площини та зазору; 8 – сопло; 9 – поворотні дзеркала; 10 – об'єктив; 11 – пристрій обертання площини поляризації; 12 – оптичний затвор; 13 – система подачі газу; 14 – юстирувальний лазер); **IV** – автоматизована система керування параметрами установки та технологічним процесом (15 – датчики параметрів лазера)

Газолазерний комплекс "Bystar-3015-3" дозволяє проводити обробку листів з максимальними габаритними розмірами  $3,0 \times 1,5$  м і вирізання деталей будь-якої конфігурації. Він має  $\text{CO}_2$ -лазер з вихідною потужністю 3 кВт, комп'ютерний блок контролю і керування процесом різання, портал з високошвидкісними приводами, два робочих змінних столи для різання і розкладання деталей, систему газопостачання, теплообмінник для охолодження робочої суміші газів з автоматичним підтриманням заданої температури, систему відбору із зони різання аерозолей та повернення чистого повітря, механізм завантаження листів з вакуумним захопленням та інші пристрої, які забезпечують роботу комплексу.

У молекулярних  $\text{CO}_2$ -лазерах співвідношення газів у робочій суміші може бути різним. В комплексі "Bystar-3015-3" використовуються гази вищого гатунку: азот технічний (99,995 %) з витратами за годину 12 л, гелій технічний (99,995 %) з витратами 26 л і  $\text{CO}_2$  (99,995 %) з витратами 2 л, тобто співвідношення газів складає 6:13:1. Цей комплекс використовується на ДП НВКГ "Зоря"–"Машпроект" для газолазерного різання високолегованих хромонікелевих сталей і жароміцних нікелевих сплавів, для яких ГЛР є безальтернативним [65].

#### *3.2.5. Особливості та сфери застосування лазерної обробки матеріалів*

Головною особливістю лазерного випромінювання є висока концентрація енергії, що перевершує всі інші джерела (див. рис. 3.1). Концентрація енергії в лазерному промені в 170 разів більша, ніж у плазмовій дузі, і в 1720 разів більша, ніж в електричній дузі з плавким електродом. Створене обладнання різної потужності забезпечує широке застосування лазерних технологій від медицини до важкої промисловості.

Лазерний промінь за допомогою оптоволоконної системи легко транспортується на значні відстані та до важкодоступних місць без втрат енергії. Енергетичні характеристики променя легко регулюються, процес лазерної обробки легко керується та автоматизується.

На відміну від ЕПЗ, яке теж має високу концентрацію енергії, лазерну обробку матеріалів можна проводити на повітрі, в інертних газах, вуглекислому газі тощо. Тому створюється можливість застосування лазерного зварювання для виготовлення конструкцій будь-яких розмірів. На лазерний промінь не впливають магнітні поля зварюваних деталей, що забезпечує стабільне формування шва по всій довжині.

Вивід лазерного променя в атмосферу дозволяє його використовувати для зварювання, різання й обробки звичайних конструкцій матеріалів. Якщо установки на базі твердотільних лазерів застосовуються для одержання мікроз'єднань елементів у радіоелектроніці, електронній техніці, то газолазерні установки потужністю до 10 кВт поширені в енергомашинобудуванні, транспортному машинобудуванні, новій техніці для зварювання і різання металів значних товщин. Створення нових лазерів дозволяє вирішити проблему зварювання металів будь-яких товщин.

Лазерне зварювання має суттєві переваги перед електродуговим зварюванням. Об'єм зварювальної ванни при ЛЗ у декілька разів менший, що при утворенні ножеподібних швів із повним проплавленням зменшує деформації укорочення виробів до 10 разів та виключає кутові деформації. Це дозволяє отримувати вироби в заданий розмір без механічної обробки або із частковою механічною обробкою. Термічний цикл ЛЗ забезпечує можливість різкого зменшення зони термічного впливу та мінімальний час перебування металу вище температури 1000 °С, що надзвичайно важливо для попередження холодних тріщин при зварюванні гартованих сталей. Зменшення перегріву металу підвищує стійкість проти гарячих тріщин зварних з'єднань аустенітних сталей та жароміцних нікелевих сплавів. Можливість транспортування променя на значні відстані дозволяє виконувати зварювання у важкодоступних місцях.

Лазерне зварювання має переваги також перед електроконтактним та конденсаторним зварюванням, які полягають у відсутності тиску, що

### 3.3. Плазмове зварювання і різання матеріалів

дає можливість з'єднувати будь-які мініатюрні деталі, зварювати в замкнутих об'ємах через прозорі стінки, у важкодоступних місцях.

На відміну від електронного променя, на лазерний промінь не впливають феромагнітні маси та зовнішні поля. При ЛЗ відсутність вакуумних камер значно спрощує технологію та знижує вартість зварювання великогабаритних виробів. Наприклад, застосування ЛЗ при виробництві корпусів суден переходить у виробничу сферу [97].

Поряд з перевагами ЛЗ має свої недоліки. Це – складність та висока вартість устаткування і його технічного обслуговування, необхідність високої кваліфікації оператора, низький ККД лазерних установок. При лазерному зварюванні виробів з високоактивних і тугоплавких металів, високолегованих сталей, жароміцних сплавів тощо існує проблема надійного захисту. У цих випадках наявність висококодосконалого вакуумного захисту дає переваги ЕПЗ.

Лазерне різання, порівняно зі зварюванням, знаходить більш широке промислове застосування. Обсяг його використання з кожним роком зростає завдяки перевагам лазерного променя перед іншими джерелами енергії. Ці переваги особливо відчутні при різанні металів товщиною до 10 мм при складних контурах. Тому за товщиною металу місце лазерного різання визначено в діапазоні до 10...15 мм. При товщині більше 10 мм на підприємствах успішно використовують газокисневе та плазмове різання.

## 3.3. Плазмове зварювання і різання матеріалів

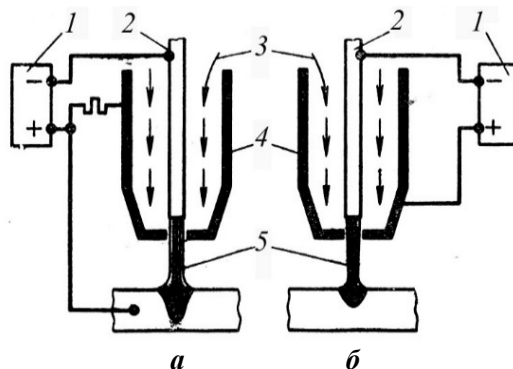
### 3.3.1. Властивості плазмового потоку

Плазма – це високоіонізований газ. Вона являє собою четвертий стан речовини, поряд з твердим, рідким та газоподібним. Плазма, яка використовується в технологічних процесах обробки матеріалів, належить до низькотемпературної (з температурою менше 100000 °С).

Плазмовий струмінь може бути прямої та непрямої дії (рис. 3.46).

Рис. 3.46. Схеми утворення дугового плазмового струменя:

- a* – прямої дії; *б* – непрямої дії;
- 1* – джерело струму;
- 2* – вольфрамовий електрод;
- 3* – плазмоутворюючий газ;
- 4* – сопло; *5* – плазмова дуга (а) і плазмовий струмінь (б)





### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

При плазмовій дузі прямої дії виріб входить до зварювального ланцюга дуги (див. рис. 3.46,*a*), на відміну від струменя непрямої дії (*б*). Плазмоутворюючий газ може бути захисним і подаватися окремо.

Для отримання плазмового струменя застосовують спеціальні пристрої, які називаються *плазмовими пальниками* або *плазмотронами*. Якщо при аргонодуговому зварюванні дуга розширюється у вигляді конуса від електрода до виробу (рис. 3.47,*a*), що розсіює енергію і зменшує глибину проплавлення металу, то стиснута дуга являє собою циліндричний стовп (*б*) та характеризується значно більш високою концентрацією енергії.

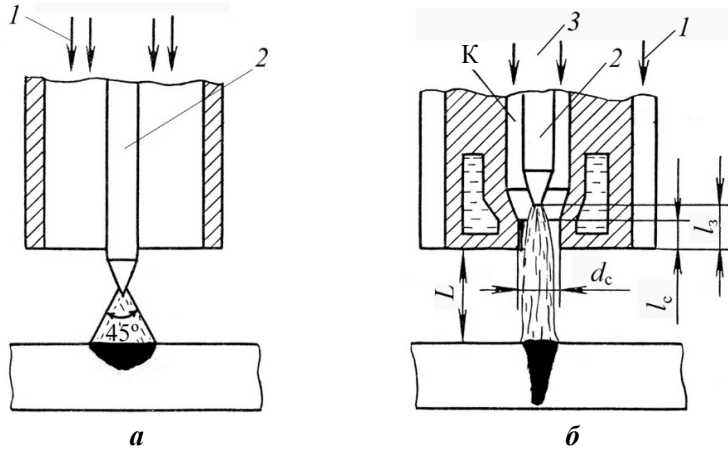


Рис. 3.47. Схеми соплової частини пальника для електродугового (*a*) та плазмового (*б*) зварювання:

1, 3 – захисний та плазмоутворюючий газ відповідно;  
2 – вольфрамовий електрод; К – катодна камера

Відстань  $l_3$ , на якій установлено електрод від зрізу сопла, називають *заглибленням електрода*;  $d_c$  і  $l_c$  – відповідно діаметр і довжина вихідного отвору сопла;  $L$  – робоча відстань.

Плазмове зварювання (ПЗ) є результатом удосконалення та розвитку електродугового зварювання неплавким вольфрамовим електродом. У плазмотронах використовують дуговий розряд значної довжини, який горить у порівняно вузькому водоохолоджуваному каналі. Через канал під тиском подається газ, який охолоджує зовнішню поверхню стовпа дуги та викликає її стиснення (стабілізацію). Унаслідок цього густина енергії в дузі та її температура різко зростають. Залежно від складу середовища температура плазми газового розряду в дузі, стабілізованій водняним вихром, досягає 20000...30000 °С, а при додаванні парів лужних металів – до 50000 °С. У дузі середньої потужності, стабілізованій пото-

### 3.3. Плазмове зварювання і різання матеріалів

ком газу (аргон, азот, водень, кисень), температура плазми дорівнює 10000...20000 °С [70].

У зварювальній техніці застосовують дві схеми плазмових пальників: прямої і непрямої дії (рис. 3.48). У пальниках прямої дії дуга 4, яка горить між електродом 1 плазмотрона і виробом В, стискується в каналі 2 з водяним охолодженням 3 (див. рис. 3.48,а). У пальниках непрямої дії дуга горить між електродом 1 та соплом 5 плазмотрона, якщо сопло 5 і канал 2 роздільні (див. рис. 3.48,б), або між електродом 1 та стінками каналу 2, якщо канал і сопло суміщені (в). Залежно від складу і витрати плазмоутворюючого газу, довжини каналу та інших факторів активна пляма дуги розташовується на бічній поверхні каналу або його торці. Плазмовий струмінь б виділяється з пальника і є незалежним від виробу.

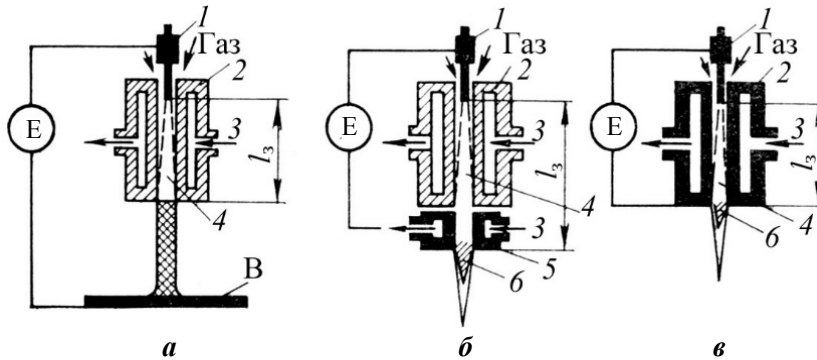


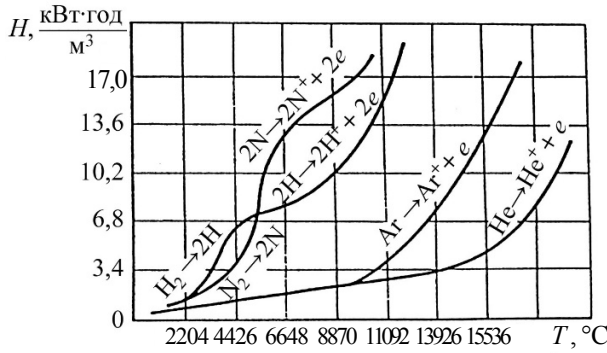
Рис. 3.48. Принципова схема дугових плазмових пальників для одержання плазмової дуги (а) і плазмового струменя при роздільних (б) та суміщених соплі і каналі (в):

Е – джерело живлення; В – виріб

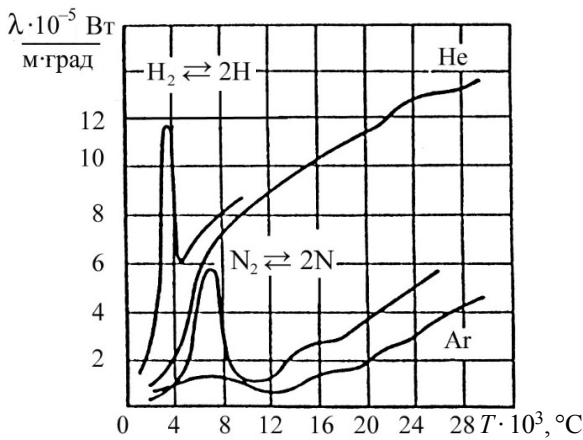
У пальниках прямої дії є два енергетичних джерела нагрівання виробу: плазмовий струмінь та електрично активна пляма дуги. Тому ККД пальників прямої дії вищий (60...80 %), ніж пальників непрямої дії, які використовують лише енергію плазмового струменя. ККД пальників непрямої дії з магнітним закручуванням дуги для зниження теплового навантаження на електроди досягає 50...70 %.

Істотно впливає на характеристики плазмового струменя плазмоутворююче середовище. Від складу середовища залежить напруженість поля стовпа дуги, густина струму в дузі, величина теплового потоку і в остаточному підсумку – ефективність перетворення електричної енергії в теплову. Склад плазмоутворюючого середовища обумовлює також процеси його взаємодії з металом при зварюванні та різанні. Як плазмоутворююче середовище можна використовувати окремі гази (аргон, азот, водень,

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...



*a*



*б*

Рис. 3.49. Ентальпія (*a*) та коефіцієнт теплопровідності (*б*) деяких газів

гелій, кисень), а також газові суміші. Ефективність плазмоутворюючого середовища визначається його енергетичними характеристиками і тепловими властивостями. Під енергетичними характеристиками розуміють здатність середовища перетворювати електричну енергію в теплову і передавати її матеріалу, що нагрівається. Важливими властивостями середовища є його теплоємність і теплопровідність. Зміну ентальпії і коефіцієнтів теплопровідності деяких газів залежно від температури показано на рис. 3.49.

Аргон має низькі значення напруженості поля і коефіцієнт теплопровідності, через що його застосування як самостійного плазмоутворюючого газу недоцільне.

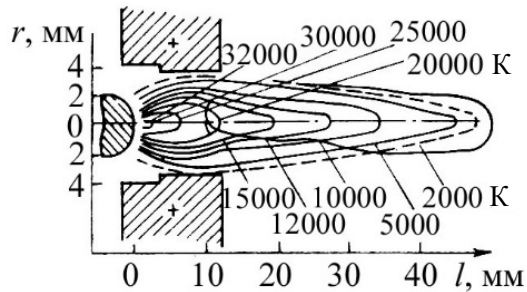
Значно кращі енергетичні характеристики має гелій, однак висока вартість і дефіцитність гелію не дозволяють його широко використовувати в промисловості. Високі енергетичні характеристики, теплоємність і теплопровідність має азот, але він активно взаємодіє з металом і електродом плазмового пальника. Кисень за енергетичними властивостями близький до азоту. Водень має гарні енергетичні характеристики: напруженість поля у водневій дузі в два-три рази вища, ніж у аргоновій, теплопровідність водню значно вища, ніж у інших газів, але як самостійне плазмоутворююче середовище він не знайшов застосування через низькі стабільність горіння дуги та стійкість сопла плазмотрона.

У промисловості звичайно використовують багатокомпонентні плазмоутворюючі середовища, такі, як аргон + водень, азот + водень, вуглекислий газ, повітря, вода, аміак тощо.

### 3.3. Плазмове зварювання і різання матеріалів

Температура плазмового струменя розподіляється нерівномірно як по радіусу, так і по довжині (рис. 3.50) [70].

Рис. 3.50. Розподіл температури в плазмовому струмені ( $U = 29$  В,  $I = 200$  А,  $d_c = 4,9$  мм, витрати аргону  $1,08$  м<sup>3</sup>/год)



#### 3.3.2. Технологія плазмового зварювання

Плазмове зварювання (*plasmaschweissen; plasma arc welding; плазменная сварка*) – електродугове зварювання, під час якого стовп дуги або його частина стискується потоком газу або магнітним полем, у результаті чого газовий потік дуги нагрівається до високих температур, іонізується і набуває властивостей плазми.

Плазмове зварювання застосовують при виготовленні деталей з нержавіючих сталей, титану, нікелевих сплавів, молібдену, ніобію та багатьох інших металів. Найбільш поширене зварювання стиснутою дугою прямої дії. Плазмова дуга за проплавляючою здатністю займає проміжне місце між зварювальною дугою в аргоні й електронним променем (див. рис. 3.1). Стовп стиснутої дуги і струмись плазми мають циліндричну форму, через що процес плазмодугового зварювання менш чутливий до зміни довжини дуги, ніж процес аргонодугового зварювання. Формування шва є стабільним. Зварювання пластин устик товщиною до 9,5 мм, а іноді і більше, ведеться без оброблення крайок і присадного матеріалу. Наприклад, плазмова дуга в суміші аргону і 7,5 % (об.) водню при силі струму 305 А та напрузі 35 В, витраті газу  $4,3 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с (1,54 м<sup>3</sup>/год) дозволяє зварювати корозійностійку сталь товщиною 12,7 мм при швидкості  $3,2 \cdot 10^{-3}$  м/с (11,4 м/год) [70]. При товщинах сталі до 25 мм проводиться V- або U-подібне оброблення крайок, причому глибина і кут оброблення значно менші, ніж при аргонодуговому зварюванні. Плазмова дуга забезпечує зварювання з глибокою і вузькою зоною проплавлення, тому відхилення осі плазмотрона від осі шва не повинні перевищувати 1,3 мм. Як плазмоутворюючі гази використовують суміші аргону з 5...8 % водню, а при зварюванні активних металів – аргон або його суміші з гелієм. Витрати газів вибирають такими, щоб забезпечити ламінарний потік без розбризкування металу зварювальної ванни. При зварюванні

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

з присадним дротом останній вводять через плазмовий струмінь у хвостову частину зварювальної ванни. Найбільш ефективно застосовують плазмове зварювання при стиковому з'єднанні товстих листів без оброблення крайок і без присадного матеріалу.

Режими плазмового зварювання деяких металів наведено в табл. 3.7.

Таблиця 3.7. Параметри режимів плазмового зварювання стикових з'єднань деяких металів<sup>1</sup>

Метал	Товщина, мм	Швидкість зварювання, м/хв	Параметри дуги		Плазموутворюючий та захисний газ
			I, А	U, В	
Нержавіюча сталь	2,4	0,97	160	31	Ar + 7,5 % H <sub>2</sub>
	3,2	0,61	145	32	Ar + 7,5 % H <sub>2</sub>
	6,4	0,36	240	38	Ar + 7,5 % H <sub>2</sub>
	12,7	0,19	305	35	Ar + 7,5 % H <sub>2</sub>
Титан	3,2	0,51	185	21	Ar
	12,7	0,25	285	38	Ar
Жароміцний нікелевий сплав	3,5	0,40	180	27	Ar
Низьковуглецева сталь	6,4	0,254	305	35	Ar

<sup>1</sup> Діаметр сопла 2,4 мм; витрати плазموутворюючого газу 0,14...0,50 м<sup>3</sup>/год, захисного газу 0,85...1,40 м<sup>3</sup>/год.

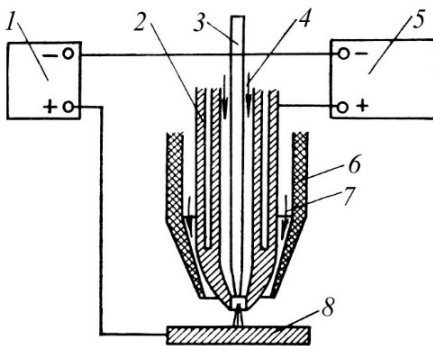


Рис. 3.51. Схема процесу мікроплазмового зварювання

Для металів малих товщин (від десятків мікрометрів до 2 мм) застосовують мікроплазмове зварювання, яке в цьому випадку має значні переваги перед усіма відомими способами зварювання [55]. Зварювання звичайно ведеться в безперервному або імпульсному режимі дугою прямої полярності, що горить між вольфрамовим електродом плазмотрона і виробом у струмені плазмоутворюючого інертного газу (як правило, аргону).

Схему процесу показано на рис. 3.51 [55].

Для зварювання використовують джерело постійного струму 1. Спеціальне малоамперне джерело живлення 5 призначене для одержання безперервно діючої між соплом 2 і електродом 3 чергової дуги.

### 3.3. Плазмове зварювання і різання матеріалів

За допомогою чергової дуги досягається стабільність процесу навіть при дуже малих силах струму (до 0,1 А), що дозволяє зварювати метали товщиною 0,01 мм. Плазмоутворюючий газ 4 пропускають між електродом і мідним 2, а захисний газ 7 – між мідним соплом 2 і керамічним соплом 6. При підведенні плазмотрона до виробу збуджується основний розряд між електродом та виробом 8, чергова дуга видувається на виріб, перетворюючись у мікроплазму голкоподібної форми. Роздільна подача плазмоутворюючого і захисного газів призводить до неоднорідності газового середовища в розрядному проміжку. Прикатодна область дуги існує в плазмоутворюючому газі, а стовп дуги і прианодна область – у захисному газі. Правильний вибір захисного і плазмоутворюючого газів, їхніх витрат, форми і розмірів сопел плазмотрона дозволяють отримати конусоподібну форму стиснутої дуги з вершиною, спрямованою на виріб. Така форма дуги спостерігається при використанні як захисних газів аргоноводневої суміші, гелію, азоту, вуглекислого газу. Якщо захисним газом є аргон, дуга має циліндричну форму. Циліндричну форму дуга набуває також при силі струму більше 20 А. У випадку збільшення витрат плазмоутворюючого газу ефект фокусування послаблюється.

Мікроплазмове зварювання ведеться при силах струму від декількох десятків міліампер до десятків ампер. Витрати газів: плазмоутворюючого  $(3,3 \dots 5,0) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  (12...18 л/год), захисного  $(50 \dots 205) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  (180...740 л/год). Пропорціонально витраті плазмоутворюючого газу зростає напруга до 20...30 В. Склад захисного газу вибирається залежно від роду зварюваних матеріалів. Звичайно це газові суміші на основі аргону з домішками водню або вуглекислого газу при зварюванні сталей, з домішками гелію або чистий гелій при зварюванні активних металів.

Мікроплазмове зварювання на прямій полярності широко застосовується при виготовленні деталей із вуглецевих та легированих сталей, міді, нікелю, титану, ніобію, молібдену та інших тугоплавких металів. Для зварювання матеріалів будь-яких марок силу струму вибирають пропорціонально товщині (рис. 3.52, *а*). Для кожної товщини існує оптимальна швидкість зварювання (див. рис. 3.52, *б*).

Для з'єднання металів товщиною до 0,3 мм розроблено спосіб імпульсного мікроплазмового зварювання, при якому нагрівання і плавлення металу здійснюються в момент подачі імпульсу струму [70]. Частота імпульсів і швидкість зварювання вибираються такими, щоб забезпечити перекриття точок. Параметри режиму імпульсного зварювання залежно від швидкості зварювання видно з рис. 3.53.

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

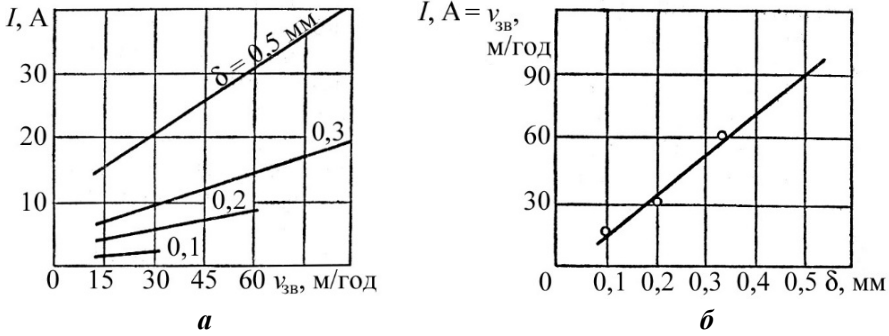


Рис. 3.52. Вплив товщини металу і швидкості зварювання на силу струму (а) та товщини металу на швидкість мікроплазмового зварювання (б) постійним струмом прямої полярності

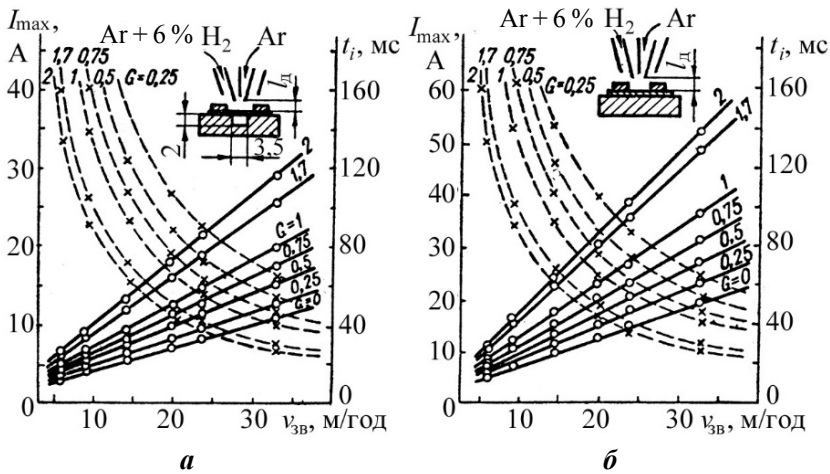


Рис. 3.53. Залежність амплітуди струму та тривалості імпульсу від швидкості мікроплазмового зварювання сталі 1X18H9T в газовій суміші  $Ar + 6\% H_2$  при різній жорсткості  $G$  ( $\delta = 0,3$  мм;  $I_d = 1,5$  мм):

а – зварювання на підкладці з формуючою канавкою;  
 б – зварювання на підкладці без канавки

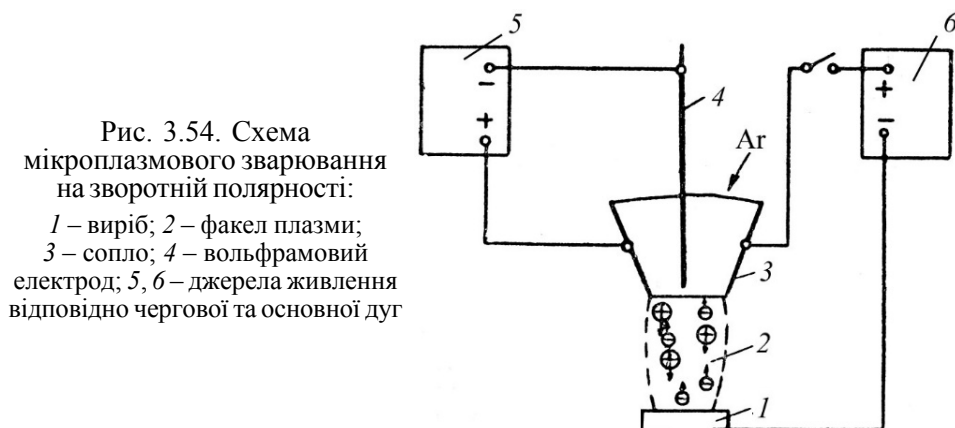
Режими імпульсного мікроплазмового зварювання вибирають з умови повного проплавлення при мінімальній ширині шва. Встановлено, що амплітуда струму  $I_{max}$  для даної товщини практично не залежить від абсолютних значень тривалостей імпульсу  $t_i$  та паузи  $t_p$ , а обумовлюється лише коефіцієнтом жорсткості режиму  $G = t_p/t_i$  [55]. Після визначення  $I_{max}$  при заданій жорсткості  $G$  вибирають тривалість імпульсу таким чином, щоб перекриття точок  $p = 50\%$ .

### 3.3. Плазмове зварювання і різання матеріалів

Мікроплазмове зварювання проводять на підкладках з піддуванням зі зворотної сторони захисного газу або без нього, що суттєво впливає на параметри режиму зварювання.

Зварювання сталі 1X18H9T показало, що ширина шва  $b$  є практично однаковою для однієї і тієї ж товщини металу  $\delta$  і складає 0,8...2,0; 1,6...1,7; 1,4...1,5 та 1,1...1,2 мм відповідно для зразків товщиною 0,8; 0,5; 0,3 та 0,1 мм.

Для зварювання алюмінію та його сплавів товщиною 0,2...2,0 мм застосовують мікроплазмове зварювання за схемою, показаною на рис. 3.54.



Факел плазми 1, що створюється черговою дугою непрямої дії, забезпечує стабільність збудження та дії основної дуги. Використання мідного водоохолодженого сопла 2 як анода основної дуги виключає дію струму дуги зворотної полярності на вольфрамовий катод чергової дуги. Сила струму чергової дуги дорівнює 2...5 А.

При малих витратах плазмоутворюючого газу (0,2...0,8 л/хв) анодна пляма основної дуги розміщується на внутрішній поверхні сопла (в каналі), а стовп основної дуги стискується захисним газом. Катодна пляма переміщується по поверхні виробу і завдяки дії іонного бомбардування та сильного електричного поля забезпечує дисоціацію оксидів і руйнування оксидної плівки без розплавлення основного металу та при катодному падінні напруги, значно меншому від енергетичного порога розпилення матеріалу катода. Якщо струм дуги зворотної полярності достатній для розплавлення крайок, то одночасно з руйнуванням оксидної плівки буде проходити процес зварювання.

Параметри режимів мікроплазмового зварювання без присадки деяких металів наведено в табл. 3.8.



### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

Таблиця 3.8. Параметри режимів мікроплазмового зварювання стикових з'єднань деяких металів<sup>1</sup>

Метал	Товщина, мм	Швидкість зварювання, м/хв	Параметри дуги		Плазмоутворюючий та захисний газ
			$I$ , А	$U$ , В	
Нержавіюча сталь	0,25	0,20	6	20...22	Ar + 5 % H <sub>2</sub>
	0,12	0,18	2	16...18	
Титан	0,2	0,13	5	16...18	Ar + 50 % He
Жароміцний нікелевий сплав	0,35	0,46	30	22	Ar + 5 % H <sub>2</sub>
	0,30	0,38	6		Ar + 75 % H <sub>2</sub>
Мідь	0,3	0,23	30	28...30	Ar + 0,5 % H <sub>2</sub>
Алюміній <sup>2</sup> АМГ6	0,3	0,50	$I_{\text{пр}} = 8 \dots 10$ ; $I_{\text{зв}} = 6 \dots 8$	-	Ar + 50 % He
	0,5	0,43	$I_{\text{пр}} = 22 \dots 26$ ; $I_{\text{зв}} = 16 \dots 18$		
	1,0	0,35	$I_{\text{пр}} = 30 \dots 34$ ; $I_{\text{зв}} = 18 \dots 22$		
	1,5	0,35	$I_{\text{пр}} = 40 \dots 50$ ; $I_{\text{зв}} = 20 \dots 25$		

<sup>1</sup> Діаметр сопла 1,0...1,5 мм; витрати плазмоутворюючого газу 0,012...0,018 м<sup>3</sup>/год; захисного газу 0,24...0,57 м<sup>3</sup>/год.

<sup>2</sup> Зварювання змінним струмом із синусоїдальними імпульсами.

$I_{\text{пр}}$  – для прямої полярності;  $I_{\text{зв}}$  – для зворотної полярності.

Недоліком описаного способу зварювання є низька концентрація енергії в дузі між соплом та виробом, що різко обмежує товщину зварювальних матеріалів. Блукання катодної плями на виробі призводить до утворення широкого шва і значної зони термічного впливу. Тому в ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено спосіб зварювання змінним струмом, при якому дуга оберненої полярності використовується лише в один півперіод для руйнування оксидної плівки на крайках деталей. Плавлення металу відбувається в другий півперіод висококонцентрованим джерелом тепла – дугою прямої полярності, яка горить між вольфрамовим електродом плазмотрона і виробом.

Між електродом і соплом плазмового пальника горить чергова дуга, яка в проміжку сопло–виріб створює факел плазми та забезпечує стабільність дуги навіть при струмах менше 1 А. При подачі на сопло пальника позитивного відносно виробу півперіоду напруги між соплом і виробом горить дуга зворотної полярності з нестационарною катодною плямою. Протягом цього півперіоду відбувається очищення поверхні виробу. Слід відзначити, що блукаюча катодна пляма очищає не лише відкриті поверхні, але проникає і в зазор між крайками, забезпечуючи

### 3.3. Плазмове зварювання і різання матеріалів

високу якість зварного з'єднання. Сила струму зворотної полярності низька і вибирається лише за умови якісного очищення поверхні. Наступний півперіод дуга горить на прямій полярності. При цьому формується плазмова дуга з високою густиною енергії для плавлення і зварювання деталей.

У винайденому способі мікроплазмового зварювання змінним струмом на сопло та електрод пальника навперемінно подаються півперіоди напруги синусоїдальної форми промислової частоти (50 Гц). Параметри режиму зварювання наведено в табл. 3.8 для алюмінію.

Через виріб проходить асиметричний змінний струм, а по вольфрамовому електроду – лише струм прямої полярності. Така схема дозволяє окремо регулювати струм прямої та зворотної полярності. *Важливими технологічними параметрами є:* режим чергової дуги, заглиблення електрода в каналі, діаметр сопла, витрати газів та величини струмів у різні півперіоди.

Спосіб зварювання змінним струмом дозволяє навперемінно подавати імпульси не лише синусоїдальної форми, але і будь-якої іншої (наприклад, прямокутної) форми різного часу дії, що значно розширює технологічні можливості зварювання. При цьому важливу роль відіграють коефіцієнти жорсткості  $G$  та асиметрії струму  $K$ :

$$G = \frac{t_{зв}}{t_{пр}}; \quad (3.38)$$

$$K = \frac{I_{пр}}{I_{зв}}, \quad (3.39)$$

де  $t_{зв}$ ,  $t_{пр}$  – відповідно тривалість імпульсів струмів зворотної і прямої полярностей;  $I_{пр}$ ,  $I_{зв}$  – відповідно сили струмів прямої та зворотної полярностей.

Дослідження стійкості вольфрамових електродів при  $K = 2$  показали, що чистий вольфрам діаметром 1 мм руйнується при  $I_{пр} = 30 \dots 40$  А, а вольфрам з лантаном або ітрієм витримує  $60 \dots 70$  А без руйнування.

Дугове зварювання металів зазвичай виконується з газовим, шлаковим або газшлаковим захистом дуги і зварювальної ванни. При зварюванні активних і тугоплавких металів захисним середовищем дуги та металу шва є інертні гази, однак для цих металів необхідний захист не лише розплавленого металу, але і металу навколошовної зони, оскільки взаємодія деяких металів з газами повітря починається з температур  $300 \dots 500$  °С. Тому розроблено способи зварювання у вакуумі [55, 88].

Існування електричного розряду і дугове зварювання у вакуумі можливі при наявності заряджених частинок – переносників зарядів. Тому

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

у вакуумі дуговий розряд розвивається в парах металу або при введенні в дугу невеликої кількості інертного газу. Дуга збуджується у вакуумі  $1,00 \dots 0,01$  Па між водоохолодним катодом і виробом, який є анодом. Якщо газ не вводиться, то дуга горить у парах матеріалу катода [88]. Напруга горіння вакуумної дуги близька до потенціалу іонізації матеріалу катода і для більшості металів дорівнює  $15 \dots 35$  В. Такий розряд має широкий діапазон сили струму – від декількох ампер до кілоампер, що дає можливість використовувати його для різних цілей. При цьому змінюються розміри та форма катода.

У розглянутих у розділі 2 вакуумних дугових гетерних насосах катоди мають велику площу, якою хаотично переміщаються катодні плями. Розряд підтримується ерозією в мікроплямах катода, густина потужності в яких досягає  $10^4 \dots 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Це забезпечує проходження локальних процесів ерозії на інтегрально-холодній поверхні катода. При дуговому зварюванні у вакуумі катодна пляма на катоді фіксується. Сила струму, при якій устанавлюється стаціонарне горіння дуги, визначається матеріалом катода. Стабілізація дуги на катоді досягається застосуванням зовнішнього аксіального магнітного поля або електростатичного екрана, який охоплює бічну поверхню катода. Кількість теплоти, яка вводиться

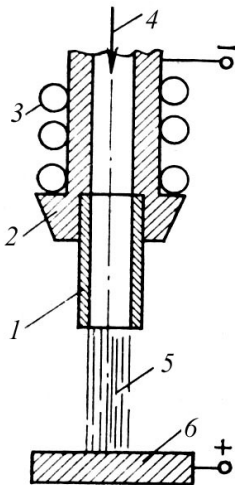


Рис. 3.55. Схема зварювання у вакуумі дуговим розрядом з порожнім катодом:

- 1 – катод; 2 – мундштук;
- 3 – водяне охолодження;
- 4 – подача аргону;
- 5 – дуговий розряд;
- 6 – виріб

в основний метал, регулюють зміною довжини дугового проміжку. Для збудження дуги у вакуумі використовують коротке замикання збуджувача електрода з катодом і випаровування матеріалу катода в місці зіткнення при протіканні електричного струму, збудження осцилятором електричного розряду в газі, невелика порція якого подається в розрядний проміжок тощо.

Для живлення дуги застосовують зварювальні випрямлячі, захист яких від перенапруги при гасінні дуги забезпечується увімкненням паралельно дузі конденсатора.

Застосовують дугове зварювання у вакуумі з неплавким порожнім катодом та стабілізацією дуги шляхом введення в розряд невеликих кількостей інертного газу, наприклад аргону, як показано на рис. 3.55 [88].

Катод виготовляють у вигляді трубки діаметром  $2,0 \dots 8,0$  мм із тугоплавких металів (тантал, вольфрам). Катодний вузол являє собою мундштук 2 з водяним охолодженням 3, на виході з мундштука встановлюють трубку 1,

згорнута з вольфрамової або танталової фольги. Через отвір катода подається аргон 4 з витратою  $(3 \dots 9) \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$  ( $1 \dots 3 \text{ л/год}$ ). Витрата газу – один з головних параметрів процесу. Розряд 5 характеризується високою стабільністю і за характером впливу на метал, що зварюється, займає проміжне положення між електронним променем і плазмовим струменем. При малих силах струму розряд має дифузну форму. У цьому випадку дугу можна додатково стабілізувати магнітним полем та одержати струми  $4 \dots 5 \text{ А}$ . Стовп розряду з порожнім катодом за своїми фізичними властивостями є фактично низьковольтним потужнострумним електронним променем, легко керованим магнітним полем.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона для виготовлення зварних конструкцій із хімічно активних металів і сплавів, вузлів електронних і електровакуумних приладів, а також для інших видів термічної обробки металів розроблено спосіб зварювання стиснутою дугою у вакуумі [55]. Суть способу полягає в тому, що у вакуумну камеру вводиться плазмотрон, в який подається в невеликій кількості аргон. З камери газ безперервно видаляється вакуумним насосом. Дуга горить між катодом плазмотрона і виробом-анодом, розміщеним усередині камери. Схему плазмотрона для зварювання стиснутою дугою у вакуумі показано на рис. 3. 56 [55].

Для мікроплазмового зварювання у вакуумі можна використовувати безістотних переробок вакуумні камери більшості установок для електронно-променевого та дифузійного зварювання. Вакуумна система камери повинна

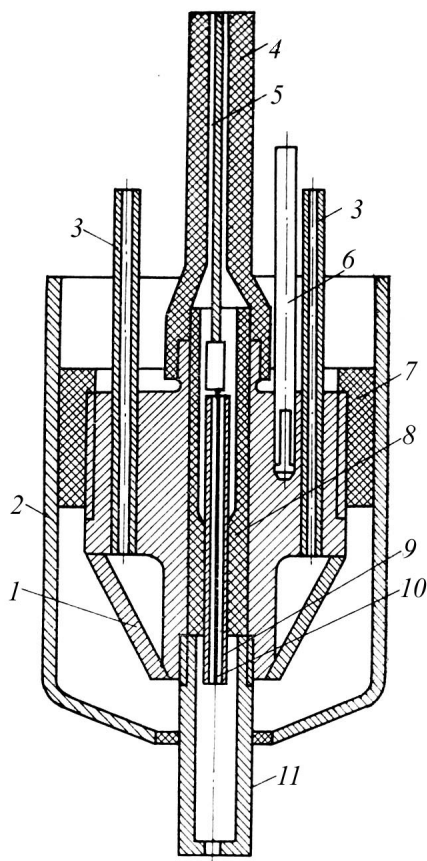


Рис. 3.56. Пальник для дугового зварювання у вакуумі:

- 1 – корпус пальника;
- 2 – металевий екран; 3 – трубка водяного охолодження; 4 – трубка подачі плазмоутворюючого газу;
- 5 – струмопідвід розжарюваного катода;
- 6 – струмопідвід пальника; 7 – керамічна вставка; 8 – фторопластова вставка;
- 9 – металева втулка; 10 – розжарюваний катод з вольфрамового дроту;
- 11 – порожній катод

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

забезпечувати вакуум  $0,1 \dots 0,6$  Па при натіканні газу  $1 \dots 3$  л/год. Таку продуктивність можуть забезпечити бустерні та механічні насоси.

Плазموутворюючим газом звичайно є аргон марки А, чистоти якого достатньо для зварювання більшості металів і сплавів. Мікроплазмове зварювання у вакуумі можна виконувати в безперервному або імпульсному режимі. Витрата газу регулюється за допомогою натікача газу типу Т-19. Термоємність електронів із розжареного катода сприяє збудженню дугового розряду, після чого живлення катода припиняється.

Дослідження і досвід застосування дугового зварювання у вакуумі показують, що воно має широкі можливості і перспективу розвитку.

#### 3.3.3. *Технологія плазмового різання*

На відміну від газокисневого різання, заснованого на згорянні (інтенсивному окиснюванні) металів у струмені кисню і примусовому видаленні цим струменем утворюваних оксидів, *суть плазмового різання* полягає у виплавленні високотемпературною плазмою металу по лінії розрізу та видаленні газовим струменем розплавленого або перегрітого до випаровування матеріалу. Завдяки високій температурі плазми можна здійснювати плазмове різання кольорових металів та їхніх сплавів, жаростійких і жароміцних сталей та сплавів, а також інших матеріалів, що погано піддаються газокисневому різанню. Плазмовий струмінь забезпечує різання також неметалічних матеріалів. Висока концентрація енергії в плазмі дозволяє вести різання з мінімальними деформаціями металу, у тому числі тонколистового.

Для різання неелектропровідних матеріалів і тонких металів застосовують незалежний плазмовий струмінь, а для кольорових металів і сплавів – плазмову дугу прямої дії. Плазموутворюючими середовищами служать азот, його суміші з воднем, повітря, суміш азоту з киснем, вода, аміак тощо. Газові середовища повинні забезпечувати ефективне перетворення та передачу матеріалу теплової енергії дуги, одержання якісного металу в зоні розрізу, стійкість проти руйнування неплавкого електрода плазмотрона, економічність процесу тощо. Для різання алюмінію і його сплавів найбільше підходять нейтральні гази, наприклад аргон.

Для різання суднокорпусних сталей застосовують повітряно-плазмове різання, тобто плазموутворюючим газом є повітря. Повітряно-плазмове різання низьковуглецевих сталей доцільне при силах струму до 300 А і має переваги перед газокисневим різанням сталей до товщин не більше 60 мм.

Досвід упровадження повітряно-плазмового різання показав, що при ньому відбувається насичення крайок азотом (рис. 3.57,*а*), яке при наступному зварюванні під флюсом сталей товщиною 8...14 мм призводить до утворення у швах пор [9, 88]. При додаванні до повітряної плазми води азотування крайок відсутнє (див. рис. 3.57,*б*).

### 3.3. Плазмове зварювання і різання матеріалів



*a*



*б*

Рис. 3.57. Мікроструктура металу після повітряно-плазмового різання з азотованою крайкою (*a*) і після різання з додаванням до повітряної плазми води (*б*);  $\times 340$

При повітряно-плазмовому різанні чітко видно азотований білий шар на крайці різання. Його мікротвердість складає до 7840 МПа. При повітряно-паровій плазмі азотований шар відсутній, а мікротвердість металу не перевищує 3660 МПа, що вище від основного металу (2470 МПа) за рахунок високої швидкості охолодження після різання.

Теоретично та експериментально встановлено, що при додаванні води в плазму пори відсутні при граничних концентраціях водяної пари в повітряній плазмі 9,5...19,2 %: нижня границя обумовлена попередженням пор, викликаних азотом, верхня – воднем. У плазмохімічних реакціях бере участь лише 9,35...12,6 % води, що подається в плазму. Решта сприяє обтисненню плазмової дуги і підвищенню її енергетичних характеристик.

При додаванні води в результаті плазмохімічних реакцій парціальний тиск азоту в повітряній плазмі знижується, а також утворюються газові суміші з воднем, який підвищує напруженість електричного поля і зменшує розчинність азоту в сталі. При цьому зменшуються неперпендикулярність крайок розрізу, зона термічного впливу, мікротвердість металу в зоні різання з 7840...8610 МПа до 3450...3660 МПа, а деформації металу практично відсутні. Таким чином, повітряно-плазмове різання з додаванням в плазму контрольованої кількості води розв'язує проблему плазмоутворюючого середовища в суднобудуванні. Це підтверджує досвід Херсонського суднобудівного заводу, на якому повітряно-плазмове різання з додаванням в плазму води успішно застосовується більше 10 років.

На інших суднобудівних заводах для підвищення якості плазмового різання і великогабаритних листів металу використовують різання під

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

водою з плазмоутворюючим газом – аргоном. Для попередження деформацій та забезпечення санітарно-гігієнічних умов використовують спеціальні водяні ванни, як показано на рис. 3.58. Відстань між верхньою поверхнею листа і поверхнею води – близько 6 см.

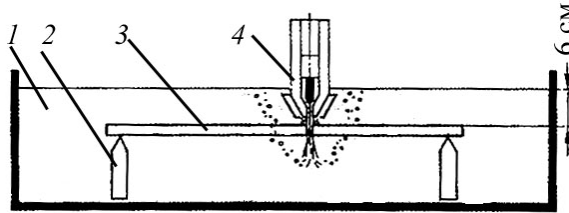


Рис. 3.58. Схема плазмового різання під поверхнею води:  
1 – вода; 2 – стіл; 3 – лист металу; 4 – плазматрон

Різання під водою забезпечує високу точність і чистоту розрізу мінімальні деформації і зону термічного впливу, значне зниження шуму та ультрафіолетового випромінювання, а також відсутність грату, забруднення робочого місця та навколишнього середовища.

Плазмове різання широко застосовують для алюмінієвих сплавів. Його основна особливість полягає в тому, що в звичайно застосовуваній плазмоутворюючій аргано-водневій суміші (близько 35 %  $H_2$ ) для підвищення якості різання необхідно знижувати вміст водню. Різання може виконуватися також в азотно-водневих сумішах, однак якість різання при цьому дещо гірша.

Для підвищення точності та якості різання розроблено киснево-плазмове різання, при якому плазмоутворюючим газом є кисень. Різання конструкційних сталей товщиною 0,5...4,0 мм виконується з підвищеною густиною енергії (діаметр сопла 0,4...0,7 мм), що забезпечує вузьку ширину розрізу, невеликі шорсткість, відхилення бокової поверхні розрізу від перпендикулярності (близькі до лазерного різання), незначну кількість або повну відсутність грату. Такий режим процесу сприяє високій точності різання. Стійкість електрода і стабільність процесу забезпечуються стабілізацією та обертанням дуги в плазматроні за допомогою магнітного поля. Діапазон регулювання сили струму при різанні складає 3...40 А, номінальна робоча напруга – 150 В, напруга холостого ходу джерела живлення – 280 В, робочий тиск кисню – 6 атм. Номінальна потужність установки SORTA PS – 5 кВт. Найбільш ефективно використання киснево-плазмового різання при товщинах до 1,0 мм. Зі збільшенням товщини металу від десятих часток міліметра до декількох міліметрів оптимальна швидкість різання знижується від 600...300 м/год до 60...30 м/год.

### 3.3. Плазмове зварювання і різання матеріалів

Для нержавіючих сталей плазмове різання доцільне при товщинах до 120 мм. Для більших товщин високу продуктивність процесу можна забезпечити киснево-флюсовим різанням. При плазмовому різанні сталі товщиною 30...120 мм можна одержати практично вертикальні стінки без напливів металу на нижніх крайках. Переваги плазмового різання порівняно з киснево-флюсовим за продуктивністю особливо помітні при товщинах до 30 мм. Різання ведуть в аргоно-водневих або азотно-водневих сумішах. З метою підвищення якості різання при збільшенні товщини металу використовують азотно-водневі суміші з низькою концентрацією водню або різання в азоті.

Основні параметри режиму різання (*сила струму і напруга дуги, швидкість різання, характеристики плазмового пальника*) залежать від товщини матеріалу, що розрізається. Наприклад, різання нержавіючої сталі товщиною 36 мм при силі струму дуги 700 А, напрузі дуги 150 В, діаметрі сопла 6 мм, витраті аргону  $3,3 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с (1,2 м<sup>3</sup>/год) і водню  $9,7 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с (3,5 м<sup>3</sup>/год) відбувається зі швидкістю  $2 \cdot 10^{-2}$  м/с (73 м/год), а товщиною 70 мм –  $0,7 \cdot 10^{-2}$  м/с (26 м/год).

Орієнтовні режими повітряно-плазмового та повітряно-мікроплазмового різання наведено в табл. 3.9.

Таблиця 3.9. Орієнтовні режими плазмового різання деяких металів<sup>1</sup>

Матеріал	Товщина, мм	Параметри дуги		Діаметр сопла, мм	Швидкість різання, м/хв	Ширина розрізу, мм
		I, А	U, В			
Вуглецеві та низь колеговані сталі	6...10	270...290	140...150	3,0	3,5...2,2	2,5...3,0
	30...40	290...310	175...195	3,0	0,65...0,3	3,0...6,0
Алюміній	6...10	270...290	140...150	3,0	5,0...3,0	3,5...4,0
	20...40	290...310	160...185	3,0	2,0...0,6	3,5...4,0
Корозійно-стійкі сталі	6...20	270...290	160...170	3,0	3,6...1,0	2,5...3,0
Мідь	20...40	290...310	170...195	3,0	0,9...0,15	2,8...3,0
Сталь Ст3 <sup>2</sup>	1...3	30	130	0,8	5,0...3,0	1,0...1,5
	7...10	100	120	1,4	1,5...1,0	2,0...2,5
Сталь 12Х18Н0Т <sup>2</sup>	0,7	20	120	1,0	0,95	1,5
	3,0	18	90	0,6	0,70	0,9
Алюміній <sup>2</sup>	1,0	20	130	0,8	4,0	1,1
	3,0	50	10	1,0	2,8	1,6
	10,0	100	105	1,4	1,6	2,0
Титан <sup>2</sup>	5,0	100	95	1,4	2,6	1,6

<sup>1</sup> Витрати повітря при плазмовому різанні – 80...90 л/хв; при мікроплазмовому різанні – 7,0...13,5 л/хв.

<sup>2</sup> Мікроплазмове різання.



### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

Вибираючи режим різання, необхідно враховувати теплофізичні властивості матеріалу, конструктивні особливості виробів тощо. Наприклад, у зв'язку з високою теплопровідністю міді та її сплавів, плазмове різання виконується при великих силах струму дуги. Різання неметалічних матеріалів відбувається за рахунок видалення матеріалу в результаті локального термомеханічного впливу високотемпературного газового потоку.

#### 3.3.4. Устаткування для плазмової обробки матеріалів

Комплект устаткування для плазмової обробки матеріалів складається з плазмотрона, пристроїв для його охолодження і переміщення, джерела струму та балонів (компресора) для забезпечення плазмоутворюючого та захисного середовищ. Головними складовими енергетичної частини устаткування є плазмотрони і джерела живлення дуги. Схеми деяких плазмотронів показано на рис. 3.59.

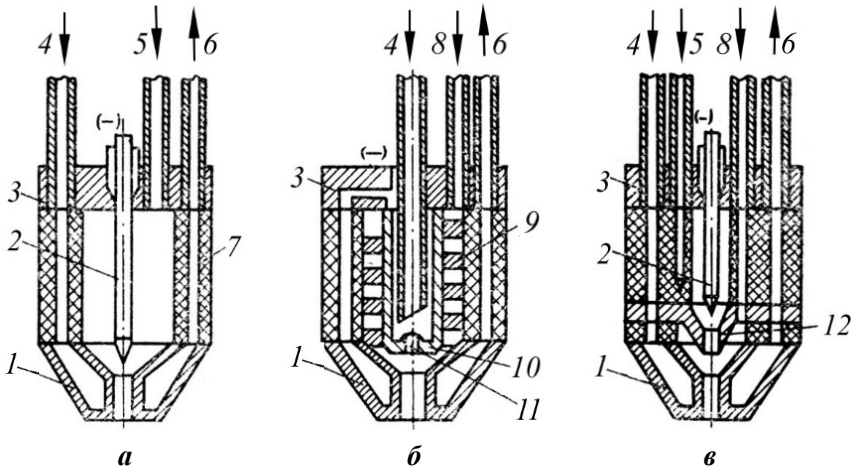


Рис. 3.59. Схеми плазмотронів:

- a* – нейтрально-газового з осьюовою стабілізацією дуги;
- б* – машинного з вихровою стабілізацією дуги; *в* – двопотокового;
- 1, 3 – сопловий та катодний вузли відповідно; 2 – вольфрамовий катод;
- 4, 6 – вхід і вихід охолодної води відповідно; 5 – захисний газ;
- 7 – корпус плазмотрона; 8 – стиснене повітря; 9 – завихрювач;
- 10 – катодотримувач; 11 – гільзовий катод; 12 – внутрішнє сопло захисного газу

Конструкція плазмотрона залежить від робочого газового середовища, способу подачі газу в дугову камеру, запалювання дуги і системи охолодження. Найбільш просту конструкцію мають плазмотрони, які працюють на нейтральних газових середовищах (див. рис. 3.59, *a*). У дуговій камері, утвореній ізольованими катодним та анодним вузлами, встановлено катод з вольфраму, який стабілізований оксидами торію,

ітрію, лантану для підвищення емісійних властивостей і стійкості в робочому середовищі. Газ подають співісно катоду. Для фіксації катодної плями дуги на електроді вольфрамовий стрижень загострюють.

У машинних плазмотронах для різання металу середніх товщин використовують вихрову стабілізацію дуги і гільзові катода (див. рис. 3.59,б). Гільзові катода складаються з гільзи-катодотримувача, в який запресовують катод. Гільза виготовляється з міді й інтенсивно охолоджується для збільшення терміну служби катодної вставки. Катодні вставки виготовляють із вольфраму, цирконію або гафнію. Гільзові катода, які застосовують при повітряно-плазмовому різанні, мають плоский торець, тому дугу стабілізують закрученим потоком газу, що фіксує катодну область дуги в центрі торця катодної вставки. При цьому катодні вставки із цирконію і гафнію утворюють тугоплавкі і термостійкі оксиди. Такі катода називають плівковими. При їхній роботі утворюється плівка розплаву, що містить оксиди і нітриди катодного матеріалу. Для тангенціальної подачі газу встановлюють завихрювальні шайби з жаростійкої кераміки. Різання з використанням кисневмісних газів виконують також пустотілими циліндричними мідними катодами, які інтенсивно охолоджуються водою. Швидке переміщення катодної плями під дією вихру по внутрішній поверхні катода забезпечує його працездатність.

На рис. 3.59,в показано двопотоковий плазмотрон, у якому робочим газом є повітря або кисень. Для захисту вольфрамового катода подають аргон. Якщо вольфрамовий електрод знаходиться в порожнині внутрішнього сопла, то в плазму перетворюється переважно аргон, а робочий газ служить для стабілізації дуги. Якщо вольфрамовий електрод знаходиться між внутрішнім і зовнішнім соплом, то в плазмі можна одержати значний вміст робочого газу. При використанні плазмотронів з газорідною стабілізацією дуги за схемою двопотокового плазмотрона кількість води вибирають такою, щоб вона цілком випаровувалася. При різанні дугою, стабілізованою водоповітряною сумішшю, насичення крайок розрізу азотом є значно меншим, ніж при повітряно-плазмовому різанні.

Схему плазмотрона для мікроплазмового зварювання було показано на рис. 3.51. Для виготовлення неплавких електродів застосовують прутки і дроти з вольфраму з лантаном (ВЛ-1), вольфраму з ітрієм (ВИ) та вольфраму з торієм (ВТ-15) діаметром 1,0...2,0 мм.

Особливістю джерел живлення плазмової дуги є високі напруги холостого ходу. Допускається напруга холостого ходу джерела струму не більше 500 В для автоматичного, 300 В для механізованого та 180 В для ручного різання.

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

Для плазмової обробки промисловість випускає спеціальні джерела живлення на тиристорах. При відсутності таких можна використовувати звичайні випрямлячі або перетворювачі з падаючими зовнішніми статичними характеристиками. Оскільки робоча напруга при різанні перевищує номінальну напругу зварювальних джерел, то два або три ідентичних джерела з'єднують послідовно. Для ручного різання розроблено індуктивно-ємнісний перетворювач, який забезпечує стабілізацію дуги і її стабільне горіння при відношенні робочої напруги до напруги холостого ходу, що дорівнює одиниці.

У промисловості для плазмового різання використовуються апарати КДП-2, ОПР-6-3М, УПР-201УЗ, ПВП-1У2, "Київ-2", "Київ-4", АВПР-2, АВПР-3, АПР-402У4 та ін. Робочим середовищем у перших двох апаратах є азот і суміші азоту з повітрям та азоту з воднем. Інші апарати призначені для повітряно-плазмового різання. Установа УПР-201УЗ використовується для ручного різання сталей і кольорових металів товщиною до 40 мм. Вона має тиристорне джерело живлення та різак з повітряним охолодженням, інтервал регулювання сили струму 150...250 А.

Установа "Київ-4" застосовується для ручного і механізованого різання металів товщиною до 60 мм, має індуктивно-ємнісний перетворювач. Для різання металів середніх товщин призначені апарати АВПР-2, АВПР-3, "Київ-2". Апарати АВПР-2 та АВПР-3 комплектуються відповідно плазмотронами ВПР-9 і ВПР-10. Установа "Київ-2" має тиристорне джерело живлення і плазмотрон ВПР-10. Установа АПР-402У4 служить для різання чорних і кольорових металів товщиною до 160 мм. Її плазмотрон можна встановлювати на різні газорізальні машини. У плазмотроні застосовано схему збудження чергової дуги, що відрізняється високою надійністю і збільшує ресурс роботи катодів і сопел. Джерело живлення – тиристорне, має напругу холостого ходу 300 В, інтервал регулювання сили струму 100...450 А, витрату повітря  $(4...5) \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$  (1,5...1,8 м<sup>3</sup>/год).

Для мікроплазмового зварювання існують тиристорні джерела живлення А-1255И, МПУ-РИ, МПУ-4, А-1281 та ін. Перші три джерела – однополярні – для безперервного та імпульсного зварювання. Джерело живлення А-1281 дозволяє регулювати амплітуду та тривалість імпульсів струму прямої і зворотної полярностей та комплектується плазмотронами ОБ-1160А для ручного зварювання на струмах до 30 А і ОБ-1213 для механізованого зварювання на струмах до 80 А. Воно призначено для зварювання алюмінію і його сплавів товщиною 0,2...1,5 мм. Установа А-1347 дозволяє зварювати метали товщиною 2,0 мм. Для зварювання практично будь-яких металів малих товщин розроблено малогабаритні конденсаторні джерела живлення типу МПІ.

### *3.3. Плазмове зварювання і різання матеріалів*

---

У суднобудуванні плазмовий струмінь найбільш широко використовують для різання металів. Завдяки заміні газокисневого різання суднокорпусних сталей повітряно-плазмовим значно підвищилися продуктивність праці та якість розрізу, скоротилася витрата дефіцитних газів та зменшилися теплові деформації металу при різанні. Повітряно-плазмове різання застосовують у складі механізованих ліній виготовлення секцій. На машинах встановлено плазмотрони, що відрізняються простотою конструкції, легкістю заміни частин і мінімальною металомісткістю. Живлення дуги здійснюється джерелом АПР-402У4.

На ряді підприємств застосовується плазмове різання під водою за допомогою машин NUMOREX та TELEREX. Остання забезпечує різке підвищення продуктивності обробки металу, оскільки має два басейни, в одному з яких почергово відбувається різання, а в другому – підготовка до різання.

Плазмове різання застосовують у суднобудуванні також для вирізання деталей з корозійностійких сталей, кольорових металів та їхніх сплавів. Використовуються машини "Кристал ПЛ-3,2", "Кристал ПЛ-2,5" тощо. Сучасні машини типу "Кристал" мають нове електрообладнання і системи числового програмного забезпечення нового покоління. Машини виконують автоматизоване розкроювання листового металу шириною 2,5 м та довжиною 10 м (3,2 м і 16,0 м). Можуть бути оснащені обладнанням для плазмового (мікроплазмового) та/або газокисневого різання. Плазмове різання дозволяє проводити розкроювання металу товщиною 5...25 мм (60 мм без пробивання), мікроплазмове – 1...16 мм. У першому випадку сила струму регулюється в інтервалі 150...400 А, у другому – 20...100 А. Плазмоутворюючий газ – повітря або кисень. Додатково машини можуть бути обладнані пристроєм для розмічування металу.

Операційна система та програмне забезпечення зберігаються в пам'яті машини.

Датчик висоти підтримує робочу відстань при різанні з точністю  $\pm 1,0$  мм. Найбільше відхилення розмірів кола діаметром 500 мм складає  $\pm 0,3$  мм. Комп'ютерна система керування забезпечує всі можливості технологічного процесу.

#### ***3.3.5. Особливості та сфери застосування плазмової обробки матеріалів***

Технологічні можливості плазмового струменя, що обумовлені високою концентрацією енергії та широким інтервалом регулювання теплової потужності, сприяють його використанню для зварювання, різання, наплавлення, напилювання, поверхневого зміцнення і плазмово-механічної обробки.

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

Зварювання плазмовою дугою застосовують при виготовленні деталей з нержавіючих сталей, титану, нікелевих сплавів, молібдену, вольфраму тощо в авіаційній та електронній промисловості, суднобудуванні, нафтохімічному машинобудуванні, інших галузях. Застосовується звичайно зварювання дугою прямої дії. Завдяки циліндричній формі стовпа дуги процес зварювання характеризується стабільним проплавленням металу. Спеціальні сопла дозволяють регулювати форму плями нагрівання. Зварювання може виконуватися в будь-якому просторовому положенні. Заміна аргонодугового зварювання труб з нержавіючої сталі на плазмодугове при товщині стінок 2,3...7,0 мм дозволяє збільшити швидкість зварювання на 50...200 %.

Мікроплазмове зварювання використовують у радіоелектроніці та приладобудуванні для з'єднання фольги, дротів і тонкостінних деталей товщиною 0,025...1,0 мм при силі струму 0,1...10,0 А.

Плазмове зварювання плавким електродом дозволяє поєднати зварювання плавким електродом в інертному газі та плазмодугове зварювання. Для живлення дуги між плавким електродом та виробом застосовують окреме джерело з жорсткою зовнішньою характеристикою.

Зварювання плазмовим струменем застосовують рідко у зв'язку з низькою продуктивністю.

Плазмове різання є одним з найбільш продуктивних процесів термічного різання, завдяки чому воно знайшло широке застосування в суднобудуванні, трубній промисловості, на металообробних і машинобудівних підприємствах, у металургійній промисловості та ін. Цей спосіб при різанні сталі товщиною до 80 мм має переваги як за продуктивністю, так і за собівартістю порівняно з газокисневим. При цьому якість поверхні різання така ж сама, як і при чистовому газокисневому різанні.

До недоліків плазмового різання слід віднести обмежені товщину металу та швидкість різання товстих заготовок. Гранична товщина металу при плазмовому різанні залежить від технології та вимог до якості різання. Максимальною товщиною при різанні сталі вважають 160 мм. При цьому слід відзначити, що в промисловості близько 70 % всього металу складає низьковуглецева сталь, у тому числі близько 80 % сталі має товщину до 80 мм. Тому обсяги застосування повітряно-плазмового різання щорічно зростають.

## 3.4. Гібридні технології зварювання і споріднених процесів

### 3.4.1. Гібридні лазерно-дугові процеси

Суть гібридних технологій полягає у використанні двох джерел тепла, які діють на метал в одній спільній зоні нагрівання. При лазерно-дугових

### 3.4. Гібридні технології зварювання і споріднених процесів

процесах зварювання такими джерелами є лазер і електрична дуга з плавким або неплавким електродом, які діють на одну зварювальну ванну [96]. Якщо електрична дуга і лазерний промінь діють не одночасно або віддалені один від одного на достатньо велику відстань, що виключає можливість утворення спільної зони нагрівання, то такий процес називають комбінованим [26, 27].

В умовах існування гібридного лазерно-дугового процесу ефективність дії кожного джерела тепла взаємно підвищується [34]. Нагрівання металу дугою збільшує коефіцієнт поглинання лазерного випромінювання, що особливо важливо при використанні лазерів малої потужності. Просторова стабілізація активної плями дуги за рахунок локалізації дугової плазми під дією лазерного променя суттєво підвищує стабільність дуги і дозволяє збільшити швидкість зварювання та продуктивність гібридного процесу.

Інтегральні і локальні характеристики плазми комбінованого лазерно-плазмового розряду істотно відрізняються від відповідних характеристик вихідної дугової плазми. Енергія, що вводиться у виріб при гібридному зварюванні, не є простою сумою енергій лазерного і дугового джерел тепла, взятих окремо. Вона дозволяє створювати нові зварювальні і споріднені технології, які мають суттєві переваги порівняно з лазерними, зокрема при гібридному зварюванні збільшуються площі поперечного перерізу переплавленого металу порівняно із сумою площ поперечного перерізу валиків, отриманих окремо дуговим і лазерним зварюванням, що дозволяє знизити вимоги до стикування з'єднаних крайок та витрати лазерної енергії.

Синергетичний ефект гібридного лазерно-дугового зварювання чітко демонструє рис. 3.60 [96]. Проплавлення сталі виконували лазером Nd:YAG при потужності променя 2,3 кВт, діаметрі фокуса 0,4 мм, фокальній відстані 100 мм, швидкості процесу 60 м/год.

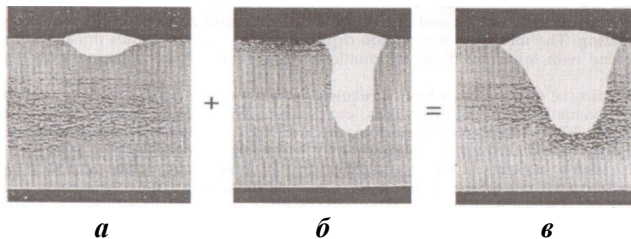


Рис. 3.60. Макроструктура металу в поперечному перерізі проплавлення хромонікелевої сталі дугою з неплавким електродом TIG (*а*), лазером Nd:YAG (*б*) і гібридним способом TIG + Nd:YAG при тих же параметрах лазерного променя і дуги (*в*)

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

При гібридному зварюванні електрична дуга стискується до розмірів факела парів зварюваного металу, який утворюється під дією лазерного променя, що доповнює ефект дії лазера. Тому при гібридному зварюванні використовують лазери меншої потужності, ніж при лазерному, що знижує вартість обладнання. Використовується електродугове зварювання як з вольфрамовим, так і з плавким електродами. При цьому застосовують просте об'єднання дії лазерної головки та електродугового пальника, як показано на рис. 3.61,*а*, або використовують головку з інтегрованим соплом (див. рис. 3.61,*б*) [66].

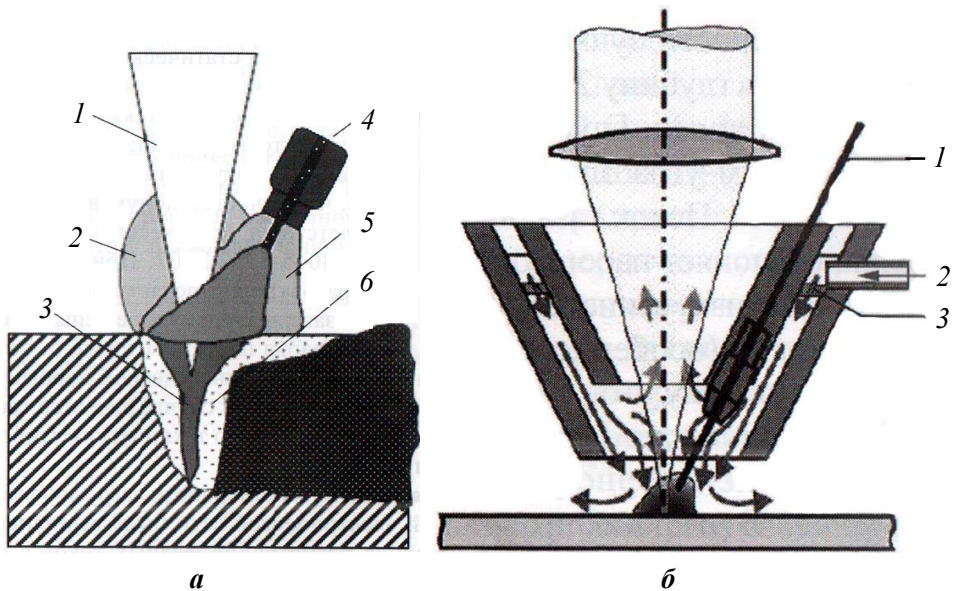


Рис. 3.61. Схема гібридного лазерно-дугового зварювання плавким електродом шляхом об'єднання дії лазерної головки з електродуговим пальником (*а*) та застосування головки з інтегрованим соплом (*б*);

1 – лазерний промінь; 2 – лазерна плазма; 3 – парогазовий канал;  
4 – плавкий електрод; 5 – захисний газ; 6 – зварювальна ванна(*а*);  
1 – зварювальний дріт; 2 – додатковий газ; 3 – дифузійна апаратура (*б*)

Завдяки унікальним властивостям гібридні лазерно-дугові процеси знаходять все більш широке застосування для зварювання, наплавлення, різання, напилювання різних металів і товщин, у тому числі і малих [7]. Як правило, використовують захисний інертний газ (гелій, аргон або їх суміші). При використанні  $\text{CO}_2$ -лазерів необхідно застосовувати захисний газ з більш високим потенціалом іонізації для запобігання утворенню плазми, здатної відхилити або поглинути лазерне випромінювання. Тому

гелій має перевагу перед аргоном. Однак гелій легший від повітря, що погіршує його захисні властивості. Тому зазвичай використовують суміші гелію з аргоном [66]. Збільшення вмісту гелію, який має нижчий коефіцієнт поглинання випромінювання, знижує роль лазерного нагрівання плазми в енергобалансі розряду і вплив випромінювання  $\text{CO}_2$ -лазера на характеристики дугової плазми послаблюється. Для реалізації в таких умовах гібридного лазерно-дугового розряду необхідно підвищувати потужність лазерного променя.

Поєднання лазерного і дугового джерел тепла при гібридному зварюванні ( $\text{CO}_2$ -лазер + TIG) може призводити до синергетичного ефекту, який полягає в порушенні принципу адитивності теплової дії лазерного променя і дуги на метал, а також в інтенсифікації динамічної дії зварювального струму на металічну ванну. В результаті енергія, яка використовується на плавлення металу, при гібридному лазерно-дуговому зварюванні (ЛДЗ) може більш ніж у 2 рази перевищувати суму енергій, які йдуть на плавлення металу при зварюванні кожним окремим джерелом тепла [96], тобто підвищується ефективний ККД джерела тепла. Фізичні фактори, які викликають синергетичний ефект, досліджено методом математичного моделювання в роботах [4, 34, 96].

Схему об'єднання в гібридному процесі стаціонарної аргонної дуги атмосферного тиску з вольфрамовим електродом (катодом) і низьковуглецевою сталлю (анодом) при силі струму 150 А та випромінювання  $\text{CO}_2$ -лазера безперервної дії потужністю 1,5 кВт, а також ізотермічні лінії в комбінованому лазерно-дуговому розряді показано на рис. 3.62. Ізотермічні лінії, починаючи від центру дуги до периферії, відповідають температурам 18000, 16000, 14000, 12000, 10000, 8000 і 6000 К. Основним елементом, який випаровується в процесі зварювання з анода, є залізо. Для спрощення математичної моделі її прийнято симетричною відносно вертикальної осі  $z_0$ .

Результати моделювання показали, що під дією додаткового локального нагрівання дугової плазми сфокусованим лазерним променем в стовпі дуги утворюється локалізована поблизу осі променя високотемпературна область, в якій максимальна температура плазми зростає з підвищенням потужності лазерного випромінювання. Така високотемпературна область дугової плазми, маючи високу електропровідність, сприяє підвищенню стабільності дуги, що дозволяє збільшити швидкість її переміщення [34].



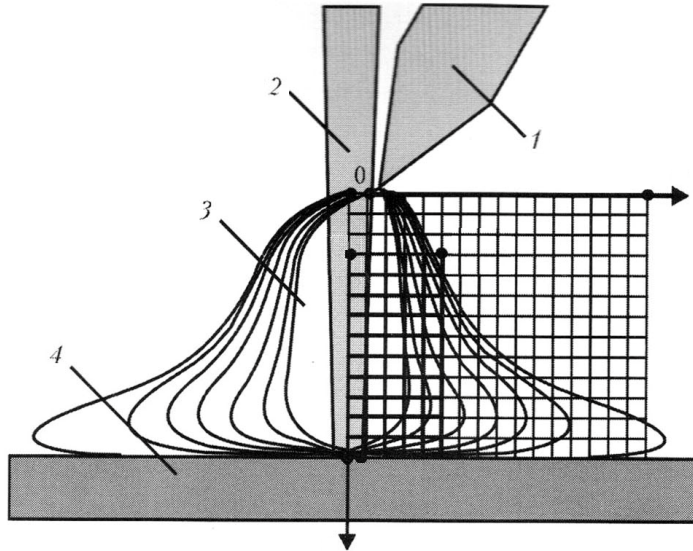


Рис. 3.62. Схема об'єднання сфокусованого лазерного випромінювання і електричної дуги, а також ізотермічні лінії в гібридному процесі:

1 – вольфрамовий катод; 2 – лазерне випромінювання;  
3 – стовп дуги; 4 – деталь (анод)

Лазерний пучок, який проходить через стовп дуги, може змінювати повний енергетичний баланс дугового розряду за рахунок додаткового поглинання лазерного випромінювання і виділення енергії в дуговій плазмі. Якщо потужність, яку вносить в дугу лазерний промінь, сумірна з її електричною потужністю, то може відбуватися настільки суттєва перебудова теплових, електричних і газодинамічних характеристик дугової плазми, що розряд по суті перестає бути дуговим і виникає новий вид газового розряду – комбінований лазерно-дуговий розряд [34, 96].

Просторові розподіли характеристик плазми лазерно-дугового розряду залежать як від потужності лазерного пучка, так і від сили струму дуги. Більш того, при малих силах струму і потужностях лазера, при яких температура плазми не перевищує 10000 К (поглинанням випромінювання CO<sub>2</sub>-лазера можна знехтувати), виникнення лазерно-дугового розряду в системі взагалі неможливе. Однак, саме в разі невеликих струмів і потужностей за умови, що вони достатні для виникнення комбінованого розряду, спостерігаються найбільш різкі відносні зміни характеристик дугової плазми.

Перерозподіл електричного потенціалу в дуговій плазмі під дією сфокусованого лазерного променя суттєво підвищує густину електричного струму в прианодній плазмі, а також густину теплового потоку,

### 3.4. Гібридні технології зварювання і споріднених процесів

який вводиться дугою в анод, що підвищує концентрацію теплової і електромагнітної дії дуги на зварюваний метал. Повна потужність, яка передається дугою в метал при ЛДЗ ( $\text{CO}_2$ -лазер + TIG), перевищує потужність, яка передається відповідною дугою в умовах звичайного зварювання неплавким електродом.

Взаємодія сфокусованого випромінювання  $\text{CO}_2$ -лазера з плазмою аргонної дуги з вольфрамовим катодом дещо зменшує потужність променя, що доходить до анода, внаслідок часткового поглинання лазерного випромінювання плазмою стовпа дуги.

Енергія, яка вводиться в метал лазерним променем при гібридному зварюванні і дузі з вольфрамовим електродом, може бути більшою або меншою ніж відповідна енергія при лазерному зварюванні і визначається умовами поглинання лазерного променя. Формування в зварювальній ванні парогазового каналу сприяє поглинанню лазерного випромінювання більш ефективно, ніж плоска поверхня розплаву.

Для наплавлювання і напилювання також використовуються процеси з поєднанням окремих плазмотронів і лазерної головки або інтегровані плазмотрони. Схему інтегрованого плазмотрона непрямої дії для наплавлювання порошком показано на рис. 3.63 [96].

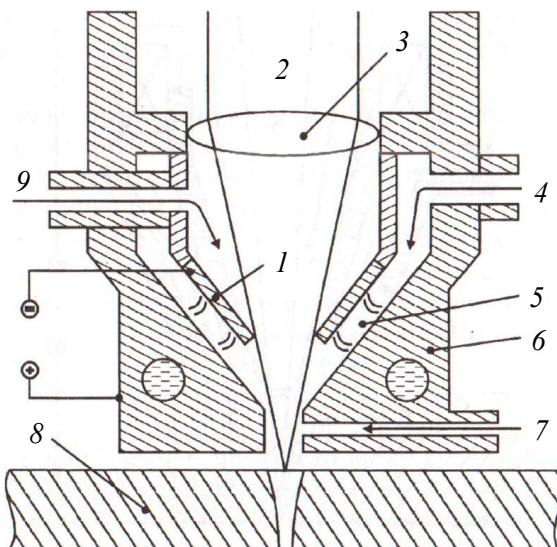


Рис. 3.63. Схema інтегрованого плазмотрона непрямої дії для наплавлювання:

- 1 – сопло лазерної головки (катод); 2 – лазерний промінь; 3 – лінза;
- 4, 9 – плазмотворючий та захисний гази відповідно;
- 5 – електрична дуга; 6 – зовнішнє водоохолоджуване сопло (анод);
- 7 – канал подачі порошкового матеріалу 8 – деталь

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

#### *3.4.2. Особливості гібридних технологій лазерно-дугового зварювання і споріднених процесів*

Основні параметри лазерно-плазмових процесів включають у себе параметри дугового розряду (напруга і сила струму) та лазерного випромінювання (потужність променя, діаметр і положення фокуса відносно поверхні виробу, фокусна відстань), а також швидкість процесу, положення і відстань лазерного променя відносно дуги. Важливе значення має вибір захисного і плазмоутворюючого газу. Якщо використовується імпульсний режим дуги або променя, то додаються також характеристики цього режиму.

Потужність лазерного променя гібридного ЛДЗ вибирається залежно від товщини металу, але вона менша, ніж при звичайному лазерному зварюванні, завдяки зниженню відбивної здатності металу, нагрітого дугою. Глибина проплавлення основного металу збільшується при зменшенні швидкості зварювання. При цьому збільшується стабільність електричного розряду і плавлення електродного дроту. Відстань між віссю лазерного променя і кінцем електродного дроту є одним з найбільш важливих параметрів оптимізації гібридного ЛДЗ з плавким електродом і зазвичай вона не перевищує 2 мм. Глибина проплавлення зростає зі збільшенням кута нахилу електрода відносно поверхні основного металу. Оскільки потік газу з дугового пальника відхиляє парогазовий факел, утворений під дією лазерного променя, то для зменшення витрат енергії променя кут нахилу електрода складає 40...50°. Максимальна глибина проплавлення при ЛДЗ досягається при фокусуванні лазерного променя під поверхню з'єднуваних листів металу на глибину 2...4 мм. Для збільшення глибини проплавлення до аргону або його суміші з гелієм додають кисень або вуглекислий газ [66].

Зазвичай для живлення зварювальної дуги застосовують постійний струм. Підвищення напруги на дузі збільшує ширину шва, що важливо при нерівномірному або підвищеному зазорі (більше 0,2 мм). При підвищенні напруги і швидкості подачі зварювального дроту допускається зазор до 1,0 мм.

При ЛДЗ стикових з'єднань вимоги до підготовки крайок щодо паралельності і перпендикулярності до поверхні менш жорсткі, ніж при ЛЗ. Розробку крайок, як правило, проводять при товщинах листів більше 8...10 мм.

Для більш конкретного розуміння гібридного ЛДЗ і його особливостей розглянемо за даними роботи [40] стикове зварювання сталі 14ХГН2МДФБ, яка належить до низьколегованих високоміцних бейнітно-мартенситних сталей, схильних до утворення в зоні термічного впливу холодних тріщин (ХТ) та крихкого руйнування при низьких температурах.

### 3.4. Гібридні технології зварювання і споріднених процесів

За вимогами зварне з'єднання сталі 14ХГН2МДФБ в стані після зварювання без додаткової термічної обробки повинне мати задані експлуатаційні і технологічні властивості. У зв'язку з цим у роботі [40] досліджували термічний цикл зварювання, стійкість проти утворення ХТ при зварюванні жорсткого вузла, структуру і механічні властивості з'єднань.

Автоматичне дугове зварювання виконували зварювальним дротом Св-10ХН2ГСМФТЮ діаметром 1,2 мм у газовій суміші  $Ar+18\% CO_2$ . Лазерне зварювання виконували ND: YAG-лазером при заглибленні фокуса  $\Delta F = -1,5$  мм. При гібридному ЛДЗ режими лазерної складової були такими, як і при ЛЗ. Параметри режимів зварювання наведено в табл. 3.10.

**Таблиця 3.10. Режими зварювання сталі 14ГН2МДФБ дуговим, лазерним та лазерно-дуговим способами**

Спосіб зварювання, $v_{зв}$ , м/год	Режими зварювання				Потужність, лазера, кВт
	$I$ , А	$U$ , В	Витрати захисного газу, л/хв	Погонна енергія, кДж/см	
Дугове, 18	230	31	14	10,70	–
Дугове, 30	230	31	14	6,42	–
Дугове, 40	230	31	14	4,83	–
Дугове, 50	230	31	14	3,83	–
Лазерне, 40	–	–	14	3,17	4,4
Лазерне, 50	–	–	14	2,54	4,4
Гібридне, 72	125	2	30	2,90	4,4
Гібридне, 90	150	25	30	2,57	4,4
Гібридне, 100	200	26	30	2,43	4,4

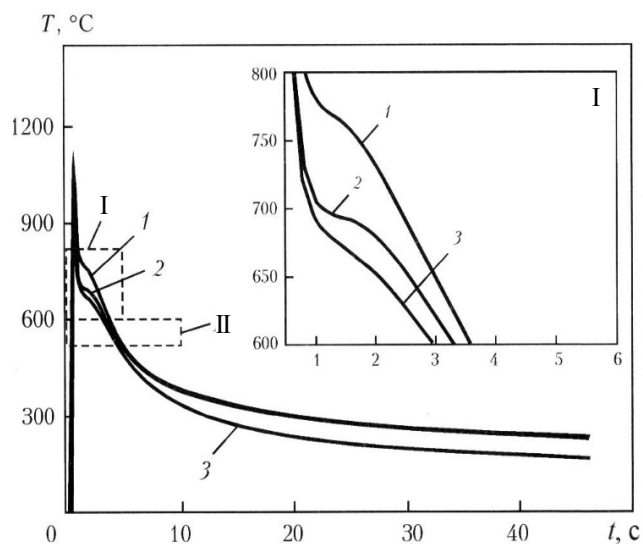
Аналіз термічних циклів зварювання показав, що в ЗТВ при лазерному зварюванні і ЛДЗ швидкості нагрівання металу в інтервалі 1100...1300 °С і охолодження ділянок перегріву в інтервалі 600...500 °С ( $\omega_{6/5}$ ) в 4–5 разів більші, ніж при дуговому автоматичному зварюванні. Висока швидкість нагрівання виключає інтенсивний ріст зерна аустеніту і підвищує стійкість проти ХТ.

Особливістю охолодження при температурах нижче 800 °С є те, що при ЛДЗ криві охолодження мають S-подібний характер (рис. 3.64,*а*), а при ЛЗ в інтервалі температур 800...600 °С спостерігається монотонне зниження кривих охолодження (див. рис. 3.64,*б*).

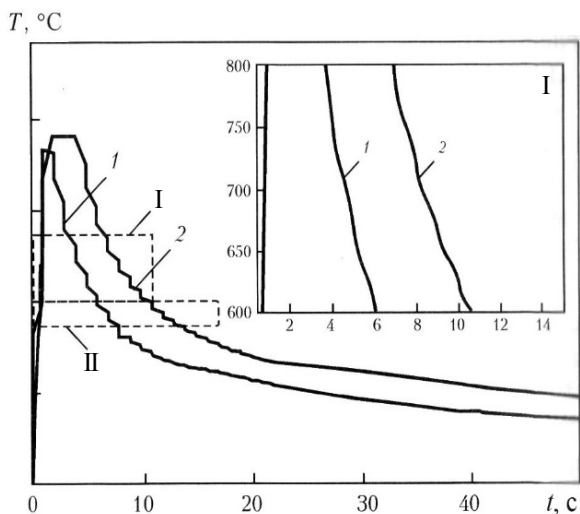
Як видно з рис. 3.64, при ЛДЗ швидкість охолодження нижче 700 °С сповільнюється, а при зварюванні зі швидкістю 90 м/год спостерігається майже горизонтальна ділянка на кривій охолодження, на відміну від кривих охолодження при ЛЗ, які ідуть майже вертикально, хоча швидкість ЛЗ

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

була меншою (40 і 50 м/год) порівняно з ЛДЗ. У роботі [40] такий характер кривих охолодження пояснюється різним введенням тепла в зварне з'єднання, а отже і різними енергетичними характеристиками дії окремого лазерного джерела та сумарної дії лазера і дуги. Зменшення швидкості охолодження сприяє підвищенню стійкості проти ХТ.



**a**



**б**

Рис. 3.64. Термічні цикли при гібридному ЛДЗ (а) і ЛЗ (б) в інтервалах температур 800...600 °С (I) і 600...500 °С (II) при швидкостях ЛДЗ 72 (1), 90 (2), 110 (3) м/год та ЛЗ 50 (1) і 40 (2) м/год

### 3.4. Гібридні технології зварювання і споріднених процесів

Підвищенню стійкості зварного з'єднання проти ХТ при лазерному зварюванні і ЛДЗ також сприяє менший вміст дифузійного водню в наплавленому металі порівняно з дуговим зварюванням. Механічні властивості зварних з'єднань наведено в табл. 3.11 [75].

**Таблиця 3.11. Механічні властивості основного металу і металу зварних з'єднань сталі 14ГН2МДФБ при різних способах та режимах зварювання**

Спосіб зварювання, $v_{зв}$ , м/год	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B$	$\delta_5$	KCV, Дж/см <sup>2</sup> , при $t$ , °С			Тип структури (шов/ЗТВ)
	МПа		%	+20	-20	-40 (шов/ЗТВ)	
Основний метал	780	820	20	–	–	35	Б
Дугове, 30	625	739	20	75	50	37/42	Б / Б-М
Дугове, 40	680	778	20	97	94	80/52	Б / Б-М
Дугове, 50	798	911	16	103	95	53/48	Б-М / Б-М
Лазерне, 40	858	925	11	53,0	23,8	14,0	Б-М / Б-М
Лазерне, 50	862	924	14	53,0	30,4	22,8	Б-М / Б-М
Гібридне, 72	907	1129	11	75,7	38,6	38,3/84,0	Б / Б
Гібридне, 90	1147	1323	10	61,5	54,0	52,1/59,0	Б-М / Б
Гібридне, 110	987	1083	12	70,0	50,3	35,8/84,0	Б / Б

Відповідно до термічного циклу зварювання змінюються структури і механічні властивості зварних з'єднань (див. табл. 3.11). Дослідження показали, що при ЛДЗ у зоні термічного впливу формується переважно структура нижнього бейніту (Б) при подрібненні зерна в 3–4 рази, що підвищує  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$ , KCV і стійкість проти ХТ, а при дуговому і лазерному зварюванні – бейніту і мартенситу (М). Механічні властивості з'єднань відповідають вимогам щодо забезпечення ударної в'язкості  $KCV_{-40} > 30$  Дж/см<sup>2</sup>. За результатами досліджень рекомендовано застосування гібридного ЛДЗ при швидкості зварювання 90 м/год.

Установлено, що використання лазерного джерела в гібридному процесі дозволяє істотно підвищити швидкість зварювання, забезпечити високий рівень властивостей зварних з'єднань, знизити вміст дифузійного водню, густину дислокацій, їх рівномірний розподіл та підвищити стійкість проти ХТ і окрихчування при температурі –40 °С.

Комбінований лазерно-дуговий розряд, який має широкі можливості керування концентрацією теплової та електромагнітної енергії, є основою нового класу пристроїв – інтегрованих лазерно-дугових плазмотронів для зварювання і споріднених процесів. Відомі різні схеми побудови інтегрованих плазмотронів на основі співвісного об'єднання лазерного променя і стиснутої дуги [34, 96]. Особливістю таких пристроїв є конструкція

### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

катодного вузла, який дозволяє вводити лазерний промінь у дугову плазму вздовж осі плазмостворюючого каналу. Для цього катодний вузол виконується у вигляді штирових термокатодів, як показано на рис. 3.65.

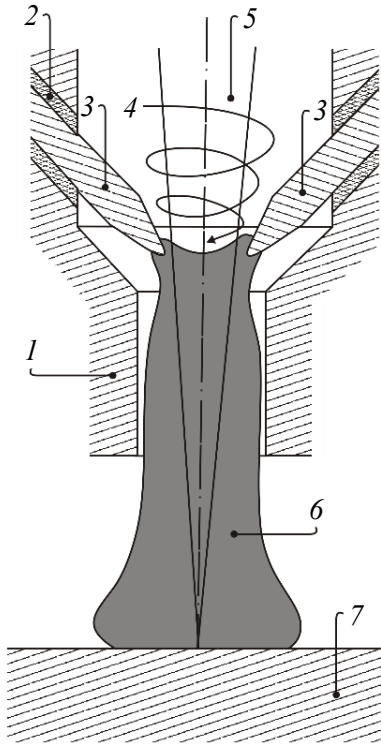


Рис. 3.65. Схема інтегрованого плазмотрона прямої дії:

- 1 – плазмостворююче сопло;
- 2 – ізолятор; 3 – штировий катод;
- 4 – плазмостворюючий газ;
- 5 – лазерний промінь; 6 – плазма;
- 7 – анод (виріб)

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона виконано теоретичні і практичні дослідження лазерно-дугових процесів, розроблено математичні моделі комбінованого розряду в плазмотронах з дозвуковою швидкістю плазмостворюючого газу, з турбулентним перебігом газу, теорію катодних процесів стосовно конкретної конструкції вузла, в тому числі трубчастого термоемісійного катода, що дозволило створити зразки різних інтегрованих плазмотронів для зварювання в автоматичному або ручному режимах [34–36, 41, 94], які запатентовано в США та інших країнах.

Для вивчення технологічних можливостей гібридного лазерно-мікроплазмового зварювання сталей, титанових і алюмінієвих сплавів розроблено конструкції та виготовлено зразки плазмотронів для роботи з діодним лазером, CO<sub>2</sub>-лазером тощо. На рис. 3.66,а показано інтегрований плазмотрон для гібридного лазерно-мікроплазмового зварювання з випромінюванням діодного лазера, який має один штировий електрод і дозволяє проводити гібридне зварювання на постійному струмі пря-

мої полярності або в режимі різнополярних імпульсів струму амплітудою до 100 А при потужності лазерного випромінювання до 2 кВт.

Для гібридного лазерно-плазмового порошкового наплавлення розроблено і створено лазерно-дуговий плазмотрон з трубчастим термокатодом, який працює при силі струму лазерно-плазмової дуги 100...280 А і потужності випромінювання CO<sub>2</sub>-лазера до 4 кВт (див. рис. 3.66,б).

Дослідження показали, що ЛДЗ плазмотрон з трубчастим термокатодом за рахунок підвищення стабільності дуги дозволяє збільшити швидкість наплавлення в 2–3 рази порівняно з плазмовим зварю-

### 3.4. Гібридні технології зварювання і споріднених процесів

ванням при потужності дуги, яка дорівнює потужності двох джерел тепла. При потужності лазера 2 кВт і силі струму дуги 150 А продуктивність наплавлення складала 2,7 кг/год, що у випадку використання тільки лазера може бути досягнуто при його потужності не менше 10 кВт. Таким чином, практичне використання інтегрованих лазерно-дугових плазмотронів показало можливості істотного підвищення швидкості і продуктивності процесу [34]. Для наплавлення застосовують плазмотрони як прямої дії (рис. 3.67, *a*), так і непрямої (*б*) [83].

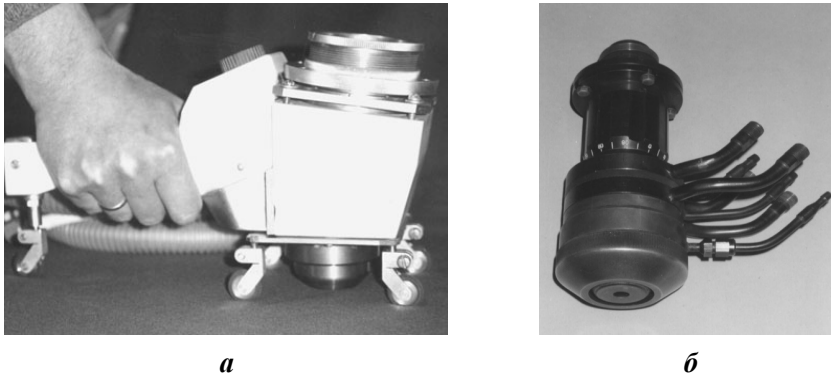


Рис. 3.66. Інтегровані плазмотрон для гібридного лазерно-мікроплазмового зварювання з випромінюванням діодного лазера (*a*) і лазерно-дуговий плазмотрон з трубчастим термокатодом для лазерно-плазмового порошкового наплавлення з використанням  $\text{CO}_2$ -лазера (*б*)

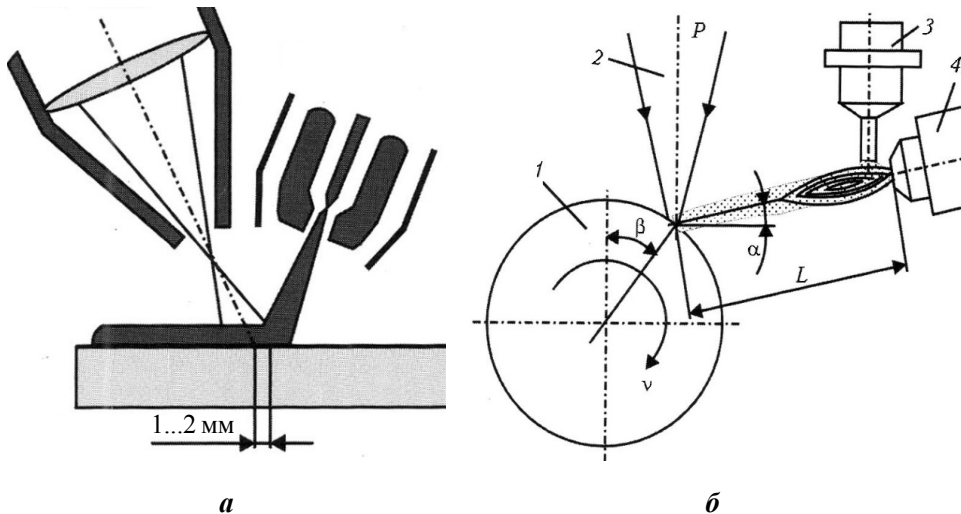


Рис. 3.67. Схеми процесів лазерно-плазмового наплавлення з плазмотронами прямої (*a*) і непрямої дії (*б*):

1 – виріб; 2 – лазерне випромінювання; 3 – порошковий дозатор; 4 – плазмотрон



### 3. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ...

Гібридне лазерно-плазмове наплавлювання за рахунок стиснення і стабілізації дуги лазерним променем дозволяє підвищити швидкість процесу, міцність зчеплення покриття з основним металом, зменшити тепло-введення, підігрівати порошок комбінованим розрядом, змінювати термічний цикл, підвищувати стійкість металу наплавлювання проти пор, тріщин тощо [83].

Основною перевагою плазмотронів прямої дії є можливість підвищення ефективного ККД, а плазмотронів непрямої дії – відсутність безпосередньої дії дуги на основний метал у випадку його високої чутливості до перегріву.

Найбільш перспективним для лазерно-плазмового наплавлювання вважається використання імпульсного випромінювання Nd: YAG-лазера з перенесенням променя по оптичноволоконному кабелю до місця обробки металу.

Ефективно працюють гібридні технології також при інших видах обробки металів. Наприклад, на рис. 3.68 показано максимальну швидкість різання при гібридному лазерно-плазмовому різанні (лазер потужністю 150 W, плазма при діаметрі сопла 1,5 мм і потужності струменя 440 W) та лазерному різанні (лазер потужністю 150 W і діаметр фокусної плями 0,5 мм) залежно від товщини нержавіючої сталі.

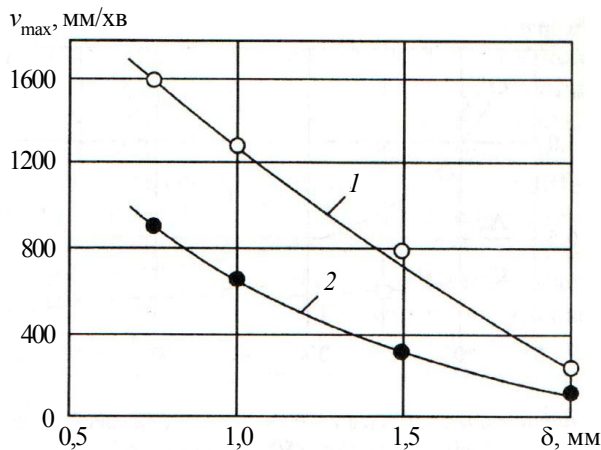


Рис. 3.68. Максимальна швидкість гібридного лазерно-плазмового (1) і лазерного різання (2) при однаковій потужності лазера залежно від товщини металу

Як видно з рисунка, використання лазера малої потужності істотно підвищує швидкість різання в гібридному процесі порівняно з лазерним.

### 3.4.3. Плазмодугове зварювання алюмінію та його сплавів

Цей спосіб є розвитком процесу зварювання алюмінієвих сплавів шляхом гібридного застосування енергії стиснутої плазми та енергії електричної дуги вольфрамовим або плавким електродом [59].

Основною проблемою зварювання алюмінію і його сплавів є видалення з їхньої поверхні оксидної плівки  $Al_2O_3$  з температурою плавлення 2050 °C (температура плавлення алюмінію 660 °C).

Ефективним способом її видалення є катодне розпилювання при зварюванні на оберненій полярності, але при цьому швидко руйнується вольфрамовий електрод. Способи поєднання мікроплазмового зварювання вольфрамовим електродом на прямій полярності та забезпечення катодного розпилювання оксидної плівки  $Al_2O_3$  розглянуто в п. 3.3.2 та описано в роботі [55]. Для зварювання алюмінію і його сплавів малих товщин (до 2 мм) використовували схеми із черговою дугою прямої полярності між вольфрамовим електродом і соплом, що забезпечує стабільність процесу, та робочою дугою оберненої полярності між соплом і виробом. Зварювання змінним струмом виконують з подачею на сопло та електрод у півперіоди напруги синусоїдальної та будь-якої іншої форми імпульсів, включаючи прямокутну, та інші.

Одним з перспективних напрямків розвитку процесів плазмодугового зварювання алюмінієвих сплавів є використання для формування зварювальної ванни одночасно енергії стиснутої дуги вольфрамового електрода та дуги плавкого електрода [59].

Розвиток технологій зварювання алюмінію і його сплавів більших товщин продовжувався з використанням плазмодугового зварювання з почерговою зміною полярностей на електроді і плазмоутворюючому соплі при збудженні дуги в півперіод оберненої полярності між виробом і соплом, плазмодугового зварювання різнополярним асиметричним струмом тощо [59]. На рис. 3.69 показано схему процесу гібридного плазмодугового зварювання з використанням для формування зварювальної ванни одночасно тепла стиснутої дуги вольфрамового електрода і дуги плавкого електрода.

На схемі, зображеній на рис. 3.69, усередині стиснутої дуги неплавкого електрода горить дуга плавкого електрода, який подається по осі плазмотрона. Іншим варіантом гібридного процесу є схема з боковим розміщенням дуги плавкого електрода відносно плазмової дуги, що діють на зварювальну ванну.

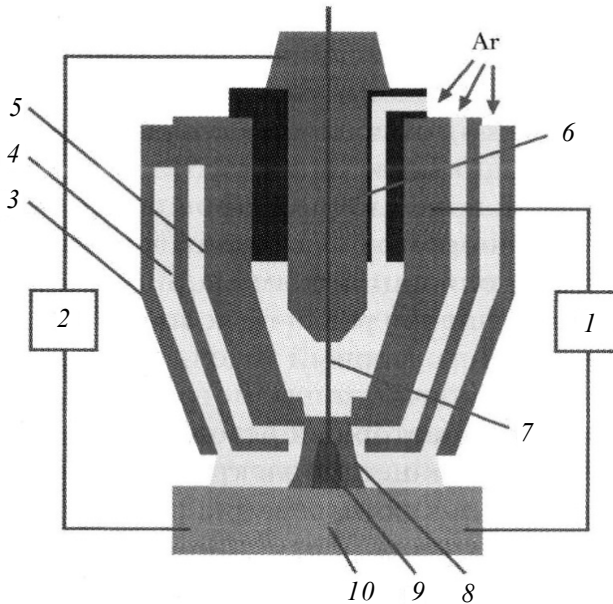


Рис. 3.69. Схема процесу гібридного плазмодугового зварювання плавким електродом:

- 1 – джерело живлення стиснутої плазмової дуги з неплавким електродом;
- 2 – джерело живлення дуги з плавким електродом;
- 3 – захисне сопло; 4 – стабілізуюче сопло; 5 – неплавкий електрод;
- 6 – струмопідвід; 7 – плавкий електрод; 8 – стиснута плазмова дуга;
- 9 – дуга з плавким електродом; 10 – виріб

Для реалізації широкого спектра плазмодугового комбінованого і гібридного зварювання ІЕЗ ім. Є.О. Патона в 2014–2015 рр. у рамках співробітництва з КНР (Китайсько-український інститут зварювання ім. Є.О. Патона) розроблено універсальний комплекс PLAZER PW-HYBRID TC [59]. Він дозволяє виконувати плазмодугове зварювання з присадним дротом на постійному струмі при прямій і оберненій полярностях, зварювання різнополярним асиметричним струмом, гібридним плазмодуговим способом плавким електродом з кільцевим анодом плазмотрона і з аксіальним підведенням зварювального дроту, комбіноване зварювання стиснутою дугою і плавким електродом, автоматичне зварювання плавким і неплавким електродом. Комплекс виконано в блоково-модульному виконанні. Для живлення дуги плавкого електрода і плазмотрона застосовуються інверторні джерела струму. Комплекс забезпечує зварювання в різних просторових положеннях [59].

Найбільш широкі можливості для зварювання алюмінію та його сплавів дає розглянуте вище гібридне лазерно-плазмове зварювання [8].

Лазерний промінь однаково добре поєднується в гібридних зварювальних процесах зі стиснутою дугою з неплавким електродом як на постійному струмі оберненої полярності, так і на різнополярному асиметричному струмі. Гібридне лазерно-дугове зварювання алюмінієвих сплавів дозволяє зменшити ширину шва, збільшити глибину проплавлення та швидкість порівняно з плазмодуговим зварюванням [59].

### **Контрольні питання і завдання**

1. Порівняйте погонні енергії зварювання при однаковій товщині листа електричною дугою з неплавким електродом, електронним і лазерним променями.
  2. Суть і особливості формування металу шва при електронно-променевому зварюванні.
  3. Параметри режиму та форма шва при ЕПЗ.
  4. Типи зварних з'єднань і підготовка до ЕПЗ.
  5. Електровакуумне обладнання для ЕПЗ.
  6. Застосування ЕПЗ на ДП НВКГ "Зоря"–"Машпроект".
  7. Лазерний промінь, його властивості та принцип утворення.
  8. Використання лазерного променя для зварювання і споріднених процесів.
  9. Переваги і недоліки лазерного зварювання.
  10. Лазерне і газолазерне різання, їх суть та особливості застосування.
  11. Порівняйте суть і можливості ацетилено-кисневого і лазерного різання.
  12. Поясніть енергетичні відмінності між електричною дугою і плавким електродом, плазмовою дугою і плазмовим струменем.
  13. Суть плазмового різання металів і плазмоутворюючі гази.
  14. Плазмове різання під поверхнею води, машини NUMOREX і TELEREX.
  15. Повітряно-плазмове різання металів з додаванням води.
  16. Гібридне лазерно-дугове зварювання, його суть та особливості.
  17. Властивості гібридної лазерно-плазмової дуги.
  18. Схеми гібридних плазмотронів для лазерно-дугового зварювання.
  19. Гібридне плазмодугове зварювання.
  20. Особливості зварювання алюмінію з використанням гібридних лазерно-плазмової дуги та плазмодугового зварювання.
-

## 4. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ І СПОРІДНЕНІ ПРОЦЕСИ ПІД ВОДОЮ, В КОСМОСІ ТА В МЕДИЦИНІ

### 4.1. Способи зварювання і різання під водою

Існуючі способи підводного зварювання перш за все класифікують залежно від середовища, в якому вони виконуються. При цьому виділяють *зварювання сухе під водою, мокре та з локальним осушенням зони зварювання*. Зварювання і споріднені процеси поділяють також за джерелами енергії. Зазвичай зварювання виконують з використанням тепла електричної дуги. Це тепло використовують також при електродуговому різанні, електрокисневому і повітряно-плазмовому різанні, хоча використовують також енергію вибуху, тепло бензиново-кисневого полум'я тощо.

#### 4.1.1. Суть способу підводного дугового зварювання

*Підводне дугове зварювання (lichtbogenschweissen unter wasser, underwater arc welding; подводная сварка)* – це дугове зварювання, яке виконується у спеціальних камерах, заповнених газом, що ізолюють зону зварювання від оточуючої води, або під час якого зварювані ділянки або повністю заготовки знаходяться під водою, а зона зварювання захищається газом, який подається або виділяється зі зварювальних матеріалів. У першому випадку зварювання називають "сухим", у другому – "мокрим". Зварювання може проводитися також з місцевою ізоляцією зони зварювання від води.

*Сухе зварювання* знайшло широке застосування у світовій практиці. Воно дозволяє отримати рівномірні зварні з'єднання відповідно до вимог стандартів, які застосовуються при зварюванні на повітрі. Виконання сухого зварювання вимагає великого підготовчого періоду і характери-

зується низькою маневреністю, значною собівартістю через використання спеціального зварювального комплексу, що має спеціальну камеру з системами енергопостачання, життєзабезпечення, видалення забруднень тощо. Наприклад, для зварювання трубопроводів застосовуються камери масою до 40 тонн, але сухе зварювання є основним способом ремонту і будівництва підводних трубопроводів, глибоководних платформ та інших конструкцій відповідального призначення. Зварювання виконують тих же сталей і тими ж матеріалами, що і при зварюванні на повітрі.

*Мокре зварювання* здійснюють безпосередньо у воді без використання додаткового захисту зони зварювання. Особливості мокрого зварювання обумовлені специфікою середовища проходження процесу. Незважаючи на більш низькі, порівняно із сухим зварюванням, механічні властивості і підвищену схильність зварних з'єднань до утворення холодних тріщин, мокре зварювання завдяки своїй простоті та універсальності широко використовується в аварійних ситуаціях при ремонті і будівництві конструкцій на порівняно невеликих глибинах.

*При зварюванні з локальним осушенням* ізолюється від води зона горіння дуги і зварювальна ванна, а сам водолаз-зварник і об'єкт зварювання знаходяться у воді. Спосіб базується на використанні різних методів утворення, утримання та стабілізації газового об'єму навколо зони зварювання. З цією метою використовують міні-камери чи спеціальні насадки, які утворюють конусоподібні водяні чи газові завіси, що спираються на зварюваний виріб і відсікають оточуючу воду. Внутрішня порожнина заповнюється захисним газом і охоплює зону горіння дуги, зварювальну ванну і ділянку виконаного шва. Утримання цієї оснастки водолазом-зварником вимагає певного зусилля, що погіршує його маневреність, а постійне виділення газових бульбашок ускладнює спостереження за процесом. Спосіб зварювання з локальним осушенням пройшов промислово перевірку в натурних умовах, але використовується вкрай рідко, в основному для виконання кільцевих швів на горизонтальній площині.

Схему підводного мокрого зварювання електричною дугою, яка горить між покритим електродом та виробом, показано на рис. 4.1.

Перші дослідження з підводного зварювання металевим електродом в 1932 р. були успішно здійснені акад. АН УРСР К.К. Хреновим. У цьому ж році були проведені успішні випробування підводного зварювання на практиці. Роботи К.К. Хренова стали фундаментом для подальшого розвитку підводного зварювання [85]. Створення нових електродів і підготовка водолазів-зварників забезпечили до кінця 50-х років ХХ століття широке застосування зварювання і різання металів під водою в судноремонті, на водному транспорті, при будівництві гідротехнічних споруд.

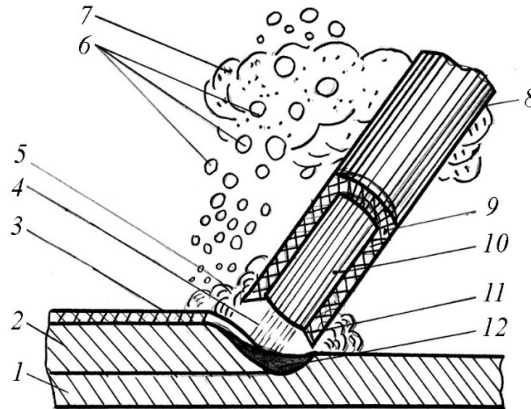


Рис. 4.1. Схема підводного електродугового зварювання покритим електродом:

1 – основний метал; 2 – метал шва; 3 – кірка шлаку; 4 – дуга;  
 5 – парогазовий пузир; 6 – металеві бризки; 7 – аерозоль;  
 8 – гідроізоляційне покриття; 9 – електродне покриття; 10 – електродний стрижень;  
 11 – козирок електродного покриття; 12 – зварювальна ванна

Фізичні і теплотехнічні властивості води та повітря істотно відрізняються, зокрема в порівнянні з повітрям густина води приблизно в 850 разів, теплоємність в 4 рази і теплопровідність в 25 разів більші, що суттєво впливає на характер проходження процесів у зварювальній дузі і властивості зварних з'єднань.

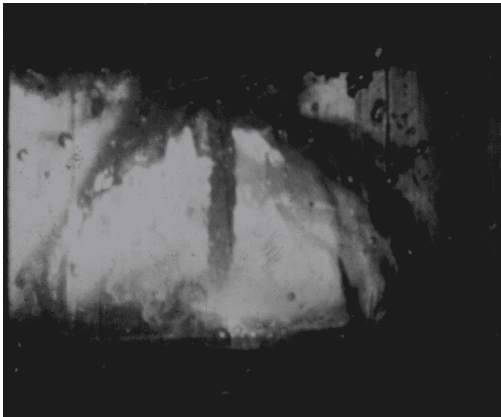


Рис. 4.2. Горіння дуги в парогазовому пузирі

Необхідною умовою існування дуги є наявність парогазового пузиря, який утворюється навколо дуги (рис. 4.1 і 4.2). Він виникає в початковий момент зварювання при торканні електродом виробу. За рахунок струму в контакті виділяється тепло і коли його стає досить для утворення водяної пари, навколо місця контакту виникає парогазовий пузир, усередині якого і збуджується електрична дуга.

Підводна електрична дуга має ряд особливостей:

– дуга горить у замкнутому парогазовому об'ємі, який постійно змінюється і безперервно поповнюється продуктами згоряння і випаро-

#### 4.1. Способи зварювання і різання під водою

вування плавкого електрода, мінерального покриття і дисоціації води, та обмежується від води стінками, що являють собою ізотермічну границю поділу двох фаз "вода–пара";

– утворення парогазового пузиря навколо дуги неминуче пов'язане зі створенням у ньому протитиску атмосферному тиску плюс тиску стовпа води над дугою, тобто тиск у пузирі прямо пропорціональний глибині занурення дуги у воду;

– дуга піддається сильному охолодному впливу водного середовища, якому сприяють рухливість пузиря та різкі зміни його об'єму.

Дугу під водою можна віднести до стиснутих. Цьому сприяють велика кількість водню в атмосфері пузиря, що становить за даними різних дослідників від 62 до 92 %, підвищений тиск і охолоджуючий вплив периферійних потоків газів [43, 100]. Через стиснення дуги густина струму у стовпі може досягати 11200...14280 А/см<sup>2</sup>, що в 5–10 разів перевищує її значення при зварюванні на повітрі електродом такого ж діаметра. За даними роботи [1] в середньому температура стовпа дуги під водою коливається залежно від сили струму і тиску в інтервалі 9000...12000 °С.

Пузир, який утворюється навколо дуги при короткочасних перервах у горінні дуги або при закінченні процесу зварювання, не зникає відразу, а концентрується навколо електродного торця, поступово зменшуючись в об'ємі. На початку процесу зварювання пузир росте від нуля до критичних розмірів, після чого він руйнується. Його велика частина (80...90 % об'єму) спрямовується вгору і виходить на поверхню води, а із залишків росте наступний пузир. Цикли послідовного росту та руйнування пузиря супроводжують процес горіння дуги під водою весь час. Із частотою 10–13 раз за секунду, його радіус і об'єм коливаються в межах 0,47...1,65 см і 0,64...9,41 см<sup>3</sup> відповідно [43, 91], що порушує стабільність горіння дуги. Тому забезпечення стабільності горіння дуги – одне з ключових завдань при створенні електродних матеріалів, розробці або вдосконаленні технологічного процесу зварювання.

Водяна пара, що становить основу атмосфери парогазового пузиря, при високих температурах дугового проміжку дисоціює з утворенням водню і кисню, наявність яких докорінно впливає на стабільність горіння дуги і перенос розплавленого металу. Кисень як поверхнево-активний елемент повинен сприяти здрібнюванню крапель завдяки зниженню поверхневого натягу рідкого металу. У той же час водень, що займає переважну частину об'єму парогазової атмосфери, через більш високу теплопровідність і через високе значення потенціалу іонізації викликає контрагування стовпа дуги і сприяє зростанню електродинамічної сили,



#### 4. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ І СПОРІДНЕНІ ПРОЦЕСИ...

яка діє на краплю з боку дуги і затримує її на торці електрода. Крім того, потрапляючи в дуговий проміжок, водень викликає його сильне охолодження і деіонізацію [90]. У підсумку водень збільшує розмір крапель металу.

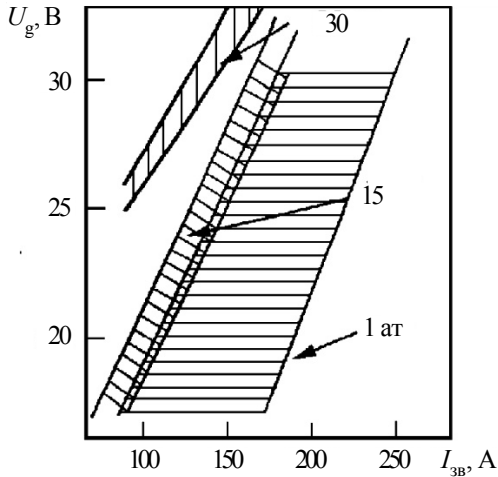


Рис. 4.3. Вплив гідростатичного тиску на положення області прийнятних значень напруги на дузі і струму при зварюванні штучними електродами мокрим способом

Високим значенням потенціалу іонізації водню пояснюється зсув області значень параметрів стійкого існування зварювальної дуги в бік високих напруг і знижених струмів, як показано на рис. 4.3. Ця область з підвищенням тиску (глибини зварювання) суттєво звужується, що ще більше ускладнює завдання забезпечення стабільності процесу мокрого зварювання [12].

Ефективним заходом підвищення стабільності горіння дуги є зниження потенціалу іонізації атмосфери дуги. Наявність елементів з низьким потенціалом іонізації зменшує напруженість електричного поля дуги, що призводить до збільшення її довжини, а також збільшує електропровідність "холодних" периферійних областей стовпа дуги і у такий спосіб забезпечує компенсацію шкідливої дії водню і гідростатичного тиску.

Підтвердженням високої здатності солей лужних металів стабілізувати підводну дугу при мокрому зварюванні є введення до порошкового дроту солі цезію  $CsNO_3$  [12]. Навіть невелика кількість (близько 1,5 %) солі цезію дозволяє значно скоротити кількість коротких замикань і обривів дуги, забезпечуючи стабільне горіння дуги на значних глибинах.

#### 4.1.2. Особливості металургійних процесів при мокрому зварюванні і формування структури металу зварних з'єднань

При підводному мокрому зварюванні можна виділити ряд фізико-металургійних і технологічних факторів, які впливають на якість зварювання. На якість з'єднань суттєво впливає склад парогазової атмосфери дуги, зокрема продукти дисоціації води, що знаходяться в зоні горіння дуги. Водень, інтенсивно розчиняючись у рідкому металі, викликає утворення пор, а кисень окиснює залізо та легуючі елементи. Тому взаємодія

#### 4.1. Способи зварювання і різання під водою

металу з продуктами дисоціації води призводить до зниження механічних властивостей зварних з'єднань.

За літературними даними парогазове середовище дуги складається з 62...92 % водню, 11...24 % оксиду вуглецю, 4...6 % вуглекислого газу і невеликої кількості азоту, пари металів і різних мінеральних солей [100]. Концентрації газів перш за все залежать від зварювальних матеріалів. Наприклад, при зварюванні електродами і порошковим дротом рутилового типу без додаткового легування вміст водню становить 93...98 %, оксиду вуглецю – 1,5...6,0 %, вуглекислого газу – 0,5...2,0 % [100]. В області високих температур дуги водень дисоціює на атомарний і розчиняється в металі. Високі швидкості кристалізації і концентрації в металі водню сприяють утворенню в металі шва пор.

При підводному зварюванні в металі шва зростає також вміст дифузійного водню. Результати порівняльних досліджень вмісту дифузійного водню в наплавленому різними електродами на повітрі і під водою металі наведено в табл. 4.1 [98].

Таблиця 4.1. Вміст дифузійного водню в наплавленому металі

Марка електрода	Основа покриття	Концентрація $[H]_{\text{диф}}$ , $\text{см}^3/100 \text{ г Me}$	
		на повітрі	під водою
D4301	Ільменіт	25	39
D4303	Рутил і карбонати	23	36
D4311	Целюлоза	25	46
D4313	Двооксид титану	24	41
D4327	Оксиди заліза	19	32

Як видно з табл. 4.1, вміст дифузійного водню при підводному наплавленні в 1,5–1,9 разу більший, ніж при наплавленні на повітрі. Високий вміст дифузійного водню різко підвищує схильність зварних з'єднань до холодних тріщин.

Окиснення металу при підводному зварюванні відбувається головним чином за рахунок водяної пари. З ростом основності шлаків і температури окисна здатність атмосфери пузиря збільшується, що призводить до вигорання легуючих елементів і збільшення кількості неметалевих вкраплень в металі шва. Досвід показав, що втрати легуючих елементів зростають зі збільшенням глибини зварювання.

*Структура з'єднань низьколегованих сталей при підводному мокрому зварюванні визначається особливістю його термічного циклу.* Однією з найбільш важливих проблем мокрого зварювання є гартівний ефект оточуючої води. Викликане швидким охолодженням гартування металу підвищує схильність до водневого окрихчування і значно знижує пластичні

#### 4. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ І СПОРІДНЕНІ ПРОЦЕСИ...

властивості зварних з'єднань. Швидкість охолодження металу від 800 до 500 °С в умовах зварювання під водою майже в 3 рази більша, ніж на повітрі, а від 800 до 100 °С більша у 8–10 разів, але вона залежить від багатьох факторів. Найбільш значимими з них є товщина основного металу, гідростатичний тиск і погонна енергія зварювання.

*Зона термічного впливу.* У результаті підвищеної тепловіддачі в умовах зварювання безпосередньо у воді при тих же режимах зварювання, що і на повітрі, ширина ЗТВ зменшується приблизно в 3 рази, що свідчить про значну локалізацію зони структурних змін основного металу.

Термомеханічне збудження металів при зварюванні призводить до істотної зміни ступеня дефектності структури в зоні термічного впливу і шві. Підвищення швидкості охолодження металу супроводжується ростом рівня скривлення його кристалічних ґраток – збільшенням напружень другого роду і зниженням розмірів блоків когерентного розсіювання. Тому окрихчуюча дія водню, що надходить зі шва, проявляється сильніше. З іншого боку, при зварюванні під водою ширина ділянки зі скривленнями кристалічних ґраток значно менша, ніж при зварюванні на повітрі.

Зі збільшенням солоності води від 0 до 30 % швидкість охолодження металу ЗТВ зростає в 1,25...1,43 разу [100]. Відповідно до цього інтегральна твердість металу ЗТВ підвищується на HV 30...40 при зварюванні у воді із солоністю 30 % у порівнянні з даними для прісної води. Структура металу шва і ЗТВ стає менш однорідною за рахунок збільшення ділянок бейнітної і мартенситної складових.

Аналіз діаграми анізотермічного перетворення сталі Х60 і дослідження фазового складу та структури зони термічного впливу з'єднань, виконаних під водою, показали, що при швидкості охолодження біля 100 °С/с, характерній для умов підводного мокрого зварювання, у ЗТВ неминуче утворюється мартенситна структура, що визначає крихкий характер руйнування зварного з'єднання під дією зовнішнього навантаження. Ширина цього прошарку звичайно не перевищує 0,5 мм, а твердість може сягати HV 430, що свідчить про високу ймовірність утворення холодних тріщин [44].

Результати численних досліджень перерозподілу водню у зварних з'єднаннях, виконаних під водою, свідчать про підвищення концентрації водню в ЗТВ поблизу лінії сплавлення [46]. Як показують результати металографічних досліджень, саме в цій зоні виникає досить дефектна мартенситна структура, яка містить значну кількість потенційних пасток для дифундуючого водню. При наявності мікротріщин та інших дефектів, а також розвинених поверхонь поділу водень заповнює внутрішні порожнини в металі і переходить у молекулярний стан. Внутрішній тиск

водню при наявності зовнішнього навантаження розтягу сприяє росту тріщин. Тому в умовах мокрого підводного зварювання низьколегованих сталей, схильних до гартування, імовірність утворення холодних тріщин у ЗТВ дуже висока. Небезпека водневого розтріскування з'являється при зварюванні сталей з  $\sigma_T > 345$  МПа [100].

Зниження швидкості охолодження за рахунок підвищення погонної енергії зварювання має обмежені можливості, оскільки зменшує продуктивність процесу, а підвищення сили струму призводить до підрізів або пропалів основного металу. Підвищенню стійкості металу ЗТВ проти ХТ сприяють використання електродних матеріалів, що забезпечують аустенітну структуру металу шва, та застосування спеціальних заходів.

У роботі [82] при зварюванні електродами установлено, що на зменшення швидкості охолодження ефективно впливає теплова ізоляція металу від води. Теплоізолюючий шар шлаку утворюється при введенні в дугу підвищеної кількості шлакоутворюючих компонентів шляхом збільшення коефіцієнта маси покриття до 1,2...1,9. На електроді АНО-4П за допомогою легкоплавкої шлакової системи  $\text{TiO}_2\text{-CaF}_2\text{-Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  збільшено коефіцієнт маси покриття до 1,2, а використання легкоплавкого в'язучого компонента для закріплення рутилового концентрату в зовнішньому шарі покриття дозволило підвищити цей коефіцієнт до 1,9. У роботі також запропоновано комбіновану теплову ізоляцію за рахунок густини шлакової кірки та шару силоксано-смоляного каучука. Силоксановий каучук з домішками епоксидної смоли має високу адгезію до металу у воді, низьку теплопровідність та підвищену термостійкість.

Ізоляція поверхні зварного шва зменшує швидкість охолодження металу зони термічного впливу в інтервалі температур 800...500 °С у 4,4–5,0 разів біля крайки шва та в 1,9–2,5 разу – під швом. Розширення теплової ізоляції на основний метал дозволяє додатково зменшити швидкість охолодження в 1,2 разу. Оптимальна ширина шару теплоізолюючого матеріалу рекомендована не більше 80 мм.

Запропонована схема теплової ізоляції дозволила зменшити швидкість охолодження в температурному інтервалі 800...500 °С у ЗТВ сталі 10ХСНД до 33...25 °С/с при погонній енергії 2,0...3,2 МДж/м. Твердість металу дорівнювала  $\text{HV}_{10}$  314...294. Холодних тріщин не виявлено.

*Метал шва.* В умовах підводного зварювання кристалізація металу шва відбувається при високих швидкостях охолодження і наявності великого вмісту водню і кисню в атмосфері парогазового пузиря. Прискорене охолодження змінює умови кристалізації швів порівняно зі зварюванням на повітрі таким чином, що первинна структура характеризується

#### 4. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ І СПОРІДНЕНІ ПРОЦЕСИ...

дрібнозернистістю і відсутністю явно вираженої хімічної неоднорідності. Мікроструктура металу шва низьковуглецевої сталі має ферит, бейніт і мартенсит. Хоча зазвичай у зварних швах таких композицій розрізняють ферит трьох типів (зернограничний, відманштетівський і голчастий), у підводних швах зустрічаються в основному два перші з них. Позначається і вплив гідростатичного тиску води. При зварюванні на малих глибинах мікроструктура складається переважно з первинного зернограничного фериту і верхнього бейніту. Зі збільшенням глибини з'являється деяка кількість відманштетового фериту.

Ще однією особливістю структури металу швів, зварених під водою, є їхнє підвищене забруднення неметалевими вкрапленнями. Це безпосередньо пов'язано з підвищеною окисною здатністю атмосфери парогазового пузиря. Відбувається інтенсивне вигорання елементів з утворенням оксидів, які через високу швидкість кристалізації зварювальної ванни не встигають видалитися в шлакову фазу. Неметалеві вкраплення у швах, виконаних під водою, в основному складаються з оксидів  $MnO$ ,  $SiO_2$  і  $FeO$ . Залежно від типу електродного покриття і гідростатичного тиску, загальна кількість неметалевих вкраплень може досягати 1 %.

Неметалеві вкраплення відіграють важливу роль у здрібнюванні мікроструктури низьковуглецевих феритних сталей і є осередками для утворення голчастого фериту. Для збільшення його кількості в структурі металу шва, виконаного мокрим зварюванням, використовують відомий принцип комплексного мікролегування титаном і бором. При цьому вдалося одержати структуру металу шва з кількістю голчастого фериту до 60 % [95].

При підводному мокрому зварюванні підвищена схильність швів до утворення пор пов'язана, в основному, з високою швидкістю їх кристалізації і з неминуче високою насиченістю металу зварювальної ванни воднем. Умови утворення пор у рідкому металі зварювальної ванни можна записати у такому вигляді

$$P \geq P_{\text{ат}} + P_{\text{гидр}} + \frac{2\sigma}{r},$$

де  $P$  – тиск газів усередині пори;  $P_{\text{ат}}$  – атмосферний тиск;  $P_{\text{гидр}}$  – гідростатичний тиск води;  $\frac{2\sigma}{r}$  – складова тиску в порожнині пори, яка обумовлена поверхневим натягом розплаву;  $\sigma$  – поверхневий натяг на границі розплавленій метал–газ;  $r$  – радіус пори.

Виходячи з цих умов, зі збільшенням глибини занурення потрібен більший тиск газів усередині зародка для утворення пори, і цей фактор є перешкодою для розвитку пористості. Однак зі збільшенням гідростатичного тиску газонасиченість рідкого металу зростає. Різде зниження розчинності газів при температурі кристалізації в комбінації з прискореним твердненням в умовах підводного зварювання призводить до формування великої кількості дрібних, рівномірно розподілених пор. Цей процес проходить більш інтенсивно при збільшенні глибини зварювання.

#### 4.1.3. Зварювальні матеріали

При сухому зварюванні використовуються ті ж способи зварювання і матеріали, що і у звичайних умовах на повітрі, з використанням стандартних зварювальних технологій. Найбільше розповсюдження отримало ручне дугове зварювання плавким електродом. Для зварювання кільцевих швів застосовується автоматичне зварювання плавким електродом (MIG або MAG), а також неплавким електродом для виконання корневих проходів.

При мокрому зварюванні безпосередньо у водному середовищі компоненти електродних матеріалів виконують ті ж функції, що і при зварюванні на повітрі, але вони повинні сприяти також вирішенню металургійних проблем, властивих зварюванню безпосередньо у воді. Виходячи зі специфічних умов зварювання у водному середовищі і можливих об'єктів зварювання, електродні матеріали повинні забезпечувати гідроізоляцію електродного покриття, легке збудження електричної дуги та підтримку стійкого процесу зварювання при можливих коливаннях довжини дуги, якісне формування металу шва, можливість зварювання в усіх просторових положеннях, утворення товстої шлакової кірки і її легке відділення, стійкість металу зварного з'єднання проти утворення дефектів металургійного характеру, мінімальне розбризкування металу та видимість зварювальної ванни.

Частина цих вимог обумовлена обмеженими можливостями водолаза-зварника, труднощами видалення бризок і шлаків, усунення напливів і підрізів. Наявність товстої шлакової кірки сприяє утриманню зварювальної ванни при зварюванні в стельовому положенні і зменшенню швидкості охолодження наплавленого металу. Відсутність можливості осушення крайок перед зварюванням, їх повного очищення від іржі та органічних речовин обумовлює необхідність вибору електродного покриття, яке забезпечує високу стійкість шва проти утворення пор.

На початку розвитку підводного зварювання роботи зазвичай виконували штучними електродами, розробленими для зварювання на

#### 4. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ І СПОРІДНЕНІ ПРОЦЕСИ...

повітрі, з покриттям целюлозного, рутилового та основного типів, наприклад УОНИ 13/45 П, АНО-4П. Єдиною їхньою відмінністю є додатковий водонепроникний шар, що захищає електродне покриття від контакту з водою.

Для гідроізоляції використовують парафін, цапонлак, гліфтальлак, бакелітовий лак, кузбаслак, перхлорвінілову смолу, розчинену в дихлоретані (7%-й розчин), аеролак тощо. Гідроізоляційне покриття наносять шляхом занурення електродів (3–4 рази) у відповідний розчин із наступним просушуванням на повітрі при кімнатній температурі після кожного занурення. Гідроізоляцію парафіном проводять шляхом занурення електродів у розплавлений парафін та витримки в ньому протягом 15...20 хв при температурі кипіння.

Як правило, при зварюванні маловуглецевих і низьколегованих сталей електродами феритного типу показники міцності перебувають на рівні властивостей основного металу. У той же час пластичність металу шва виявляється характеристикою, більш чутливою до структурних складових, водневого окрихчування і наявності дефектів (пор, мікротріщин, шлакових вкраплень тощо). При випробуваннях на вигин ініціатором виникнення тріщин є пори і неметалеві вкраплення. Здебільшого відносно подовження не перевищує 9 %, що суттєво нижче від значень цього показника при зварюванні на повітрі. Про проблему пластичності свідчить також недостатньо високий рівень значень ударної в'язкості, що не перевищує 40 Дж/см<sup>2</sup> при температурі випробувань 0 °С [99]. Зі збільшенням глибини зварювання величина ударної в'язкості знижується і при зварюванні на глибині 100 м становить 18 Дж/см<sup>2</sup>. Застосування нікелевих електродів дозволило значно підвищити ударну в'язкість при температурі випробувань –10 °С – до 83...88 Дж/см<sup>2</sup> на глибині 3 м і до 45 Дж/см<sup>2</sup> на глибині 55 м [99].

Для мокрого зварювання застосовують електроди діаметром 3...5 мм. Найбільш широке застосування знайшли електроди ЕПС-АН1, ЕПС-АН2, ЕПС-АН2А та Broco Softtouch для зварювання на глибині до 30 м у нижньому, вертикальному і стельовому положеннях. При зварюванні електродами ЕПС-АН2 діаметром 4 мм на оберненій полярності в нижньому положенні сила струму дорівнює 160...200 А, при діаметрі 5 мм – 200...250 А. При зварюванні у вертикальному положенні сила струму зменшується на 20 А, при стельовому – на 40 А, порівняно з нижнім положенням. Зазвичай виконують таврові, кутові та напусткові з'єднання, рідше – стикові. Швидкість зварювання складає 4,0...6,0 м/год.

Електроди рутилового типу ЕПС-АН2 призначено для зварювання низьковуглецевих і низьколегованих сталей з вуглецевим еквівалентом

#### 4.1. Способи зварювання і різання під водою

до 0,35 % і границею плинності до 350 МПа та забезпечують  $\sigma_B = 420 \dots 440$  МПа,  $\sigma_T = 340 \dots 360$  МПа,  $\delta = 12 \dots 14$  %, KCV = 30...35 Дж/см<sup>2</sup> при -20 °С. Метал шва має феритно-перлітну структуру з окремими ділянками бейніту.

Електроди основного типу ЕПС-АН2 призначено для низьколегованих сталей підвищеної міцності і забезпечують  $\sigma_B = 600 \dots 620$  МПа,  $\sigma_T = 390 \dots 410$  МПа,  $\delta = 30 \dots 40$  %, KCV = 110...130 Дж/см<sup>2</sup> при -20 °С. Наплавлений ними метал має глибокоаустенітну структуру. За останні роки на світовому ринку з'явилися також нові марки спеціальних електродів для мокрого підводного зварювання.

Підводне мокре зварювання електродами забезпечує високу мобільність процесу, добру захищеність краплі розплавленого металу, невелику масу та габарити обладнання, яке занурюється у воду, але має низьку продуктивність, велику кількість газової фази та аерозолей, що ускладнюють візуальний контроль формування шва, значний розкид механічних властивостей з'єднань залежно від глибини виконання робіт та кваліфікації зварника. Цих недоліків у значній мірі не має механізоване підводне мокре зварювання самозахисними дротами [52]. Для механізованого підводного зварювання можна застосовувати подавання захисного газу окремо, наприклад CO<sub>2</sub> зі зварним дротом Св08Г2С, але це істотно не впливає на якість зварювання, значно ускладнюючи роботу зварника.

Мокре механізоване зварювання порошковими дротами виконують при ремонті корпусів суден наплаву, підводних трубопроводів, гідротехнічних споруд з широким використанням розроблених в ІЕЗ ім. Є.О. Патона дротів ППС-АН2, ППС-АН5, ППС-АН4, ППС-ЭК1, ППС-АНВ25 [9]. Дріт ППС-АН2 застосовують для механізованого зварювання низьковуглецевих і низьколегованих сталей з вуглецевим еквівалентом до 0,35 % і границею плинності до 350 МПа на глибинах до 30 м. Порошковий дріт ППС-АН4 використовують для підводного механізованого та автоматичного зварювання низьколегованих сталей підвищеної міцності на глибинах до 150 м. Дріт ППС-АНВ-25 призначено для зварювання хромо-нікелевих аустенітних сталей типу 18-10.

Порошкові самозахисні дроти ППС-АН2, ППС-АН5, ППС-ЭК1 при зварюванні сталі 09Г2 забезпечують міцність шва на рівні 80...90 % від міцності основного металу, при зварюванні сталі 10ХСНД – на рівні 70...80 %. Продуктивність наплавлення порошковими дротами досягає 5 кг/год, а штучними електродами – 1...2 кг/год.

При мокрому механізованому зварюванні самозахисними порошковими дротами використовують джерела живлення з жорсткою вольт-амперною характеристикою при силах струму 100...250 А і напрузі дуги



#### 4. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ І СПОРІДНЕНІ ПРОЦЕСИ...

26...35 В. Для компенсації втрат у зварювальному ланцюгу при довжині біля 60 м джерело живлення повинне мати підвищену напругу холостого ходу.

*При підводному зварюванні з локальним осушенням зварювальні матеріали вибирають аналогічно мокрому зварюванню.*

##### 4.1.4. Термічне підводне різання

При виконанні підводних робіт широко застосовують *підводне різання*. Термічне різання здійснюється під дією теплоти, яка виділяється при горінні газів, зокрема водню, ацетилену, інших вуглеводнів, бензину, електричною дугою, при екзотермічних реакціях. До термічних способів різання відносять газокисневе, наприклад воднево-кисневе, бензиново-кисневе, екзотермічне, електродугове, киснево-дугове та плазмове різання. Для забезпечення безперервності процесу підводне різання вимагає більш потужних джерел теплоти, ніж різання на повітрі.

Процес підводного різання проходить при витісненні води, яка покриває місце різання. *При газо-кисневому різанні* це досягається створенням захисного пузиря навколо ядра газового полум'я. Наявність гідростатичного тиску вимагає створення протитиску в захисному пузирі, що значно збільшує витрату газів.

Для утворення захисного пузиря сопло газо-кисневого різача має певну будову. Кисень для різання подається по внутрішньому центральному каналу, пальна суміш – по середньому, а повітря для створення захисного пузиря – по зовнішньому. Повітря подається суцільним струменем по кільцевому каналу, утворюючи надійний захист зони різання. Таким чином, різання відбувається в газовому середовищі і процес відрізняється від наземного лише тим, що робота виконується при підвищеному тиску й обмеженому газовому об'ємі.

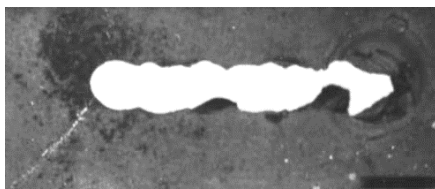
Високопродуктивним способом підводного різання металів є *бензиново-кисневе різання*, при якому можна різати метал суцільного перерізу товщиною до 100 мм і пакети товщиною до 95 мм за один прохід. Для різання використовується різак, в якому бензин попередньо не випаровується, а подається в зону спалювання у вигляді дуже тонкого пилу. При цьому продукти згоряння утворюють стабільний газовий пузир, що виключає необхідність подання додаткового повітря.

Бензин подається під тиском азоту. Витрати бензину складають 10...20 кг і кисню 30...50 м<sup>3</sup> за 1 год роботи. Швидкість різання бензиново-кисневим полум'ям на 20...30 % більша, ніж воднево-кисневим. До комплекту установки входять 6–12 балонів кисню, балони з бензином і азотом, різак, акумулятори та електрозапальничка.

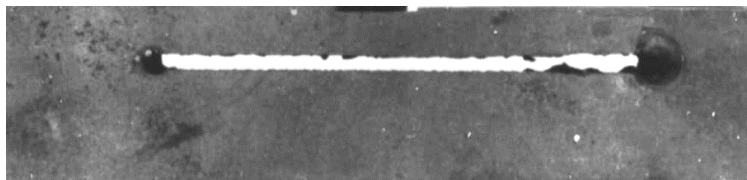
#### 4.1. Способи зварювання і різання під водою

Іншим способом є підводне електродугове різання. Воно проводиться на постійному струмі прямої полярності, оскільки при цьому більша кількість тепла виділяється в основному металі, або на змінному струмі металевими чи вугільними електродами. У зв'язку з тим, що якість і продуктивність електродугового різання невисокі, воно застосовується при виконанні малих обсягів робіт. Зазвичай цим способом розрізають, а точніше, виплавляють і випалюють чавун, кольорові метали і сплави, нержавіючі сталі. Використовуючи електроди діаметром 5 мм і струм силою 350...500 А, можна розрізати метал товщиною 50 мм і більше. Зі збільшенням товщини металу продуктивність різання різко падає, а витрати електродів зростають. Тому цей спосіб рекомендується використовувати при товщинах не більше 20 мм. Інтенсифікація процесу досягається шляхом збільшення густини струму при зменшенні діаметра електрода. Для різання можна застосовувати ті ж електроди, що і для зварювання, але більш доцільно використовувати спеціальні покриті електроди для підводного різання типу АНР-5П [21].

Високу ефективність має механізоване підводне *електродугове різання порошковими дротами*, які застосовуються при зварюванні. Спеціальні порошкові самозахисні дроти забезпечують плавлення та окиснення металу і його видалення за рахунок дії газоутворюючих компонентів порошкового дроту. Цей спосіб застосовують для різання сталей товщиною до 40 мм при силах струму 450...1200 А на глибинах більше 100 м. Різання товщин металу до 20 мм виконують при силах струму 300...600 А. Зовнішній вигляд розрізів, виконаних на глибинах 10 і 300 м, показано на рис. 4.4.



*a*



*б*

Рис. 4.4. Зовнішній вигляд розрізів, виконаних порошковим дротом на глибині 10 (*a*) і 300 (*б*) м

#### 4. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ І СПОРІДНЕНІ ПРОЦЕСИ...

*Киснево-дугове різання* можна розглядати як удосконалення електро-дугового і кисневого різання. Різання починається з подачі кисню, після чого збуджується електрична дуга. Виконується різання трубчастими електродами зі спеціальним покриттям. У процесі різання потрібно підтримувати постійне горіння дуги. Для припинення процесу спочатку необхідно обірвати дугу, а потім припинити подачу кисню. Продуктивність електрокисневого різання вища, ніж електродугового. Використовуються спеціальні електроди ЕПР-1 та АНР-Т8. Киснево-дугове різання ведуть при оберненій полярності.

*Плазмове різання* виконують з використанням повітря як плазموутворюючого газу. Для повітряно-плазмового різання використовують двопотоківі плазмотрони, що забезпечують більш стабільний процес різання. При виконанні різання спочатку збуджується чергова дуга, а потім при русі різача по конструкції автоматично утворюється плазмований конус. Поверхні нержавіючих сталей, що розрізаються, мають шлак, який легко видаляється зі зворотної сторони, та незначне окиснення і шорсткість – з лицьової. При різанні алюмінію зворотна сторона розрізу має зовсім чисту поверхню, а лицьова сторона – окиснена і шорсткувата.

Плазмове підводне різання є універсальним і продуктивним способом, але його істотним недоліком є висока робоча напруга дуги. Найбільш розповсюджене у повсякденній практиці ручне дугове різання. Застосовують також *екзотермічне різання*. Воно є менш продуктивним, але придатне до різання неметалів і може виконуватися без використання електричного струму. *Екзотермічне різання* відбувається під дією теплоти, яка виділяється при термічних реакціях, наприклад відновлення алюмінієм заліза з його оксидів. Різання виконує потік розжарених газів, що виходять з великою швидкістю з реактора через сопло з круглим отвором або з отвором у вигляді довгастої щілини залежно від форми розрізу.

Різання металів під водою може виконуватися також з використанням енергії вибуху [70]. *Різання вибухом* проводиться з використанням комунікативних зарядів, які викладаються по лінії різання. Цей процес не залежить від глибини, а швидкість різання складає частки секунди. При викладанні заряду необхідно точно знати лінію різання і забезпечувати щільне прилягання заряду до поверхні металу. При попаданні під заряд води метал у цьому місці залишається непрорізаним.

Для різання під водою застосовують також механічні способи різання металу малих товщин.

##### **4.1.5. Обладнання для зварювання і різання та їх застосування**

Для механізованого та автоматичного підводного зварювання і різання порошковим дротом в ІЕЗ ім. Є.О. Патона створено ряд напівавтоматів

#### 4.1. Способи зварювання і різання під водою

оригінальної конструкції, запатентованих у ряді промислово розвинених країн. Сучасна елементна база, нові матеріали і комплектуючі дозволили оновити парк розробок напівавтоматів з метою додання їм нових технічних і технологічних можливостей.

Останню модель напівавтомата ПШ-160 (рис. 4.5) призначено для підводного зварювання і різання металевих конструкцій у прісній і морській воді при гідростатичному тиску до 2,0 МПа (глибина – 200 м). Напівавтомат складається з двох частин – заглибного блока зі зварювальним пальником і блока керування. Обидві частини з'єднуються кабелями керування.

Напівавтомат працює на постійному струмі, діаметр зварювального дроту 1,6...2,0 мм, сила струму до 400 А при тривалості включення 60 %, швидкість подачі зварювального дроту 100...600 м/год з плавним регулюванням, живиться від мережі при частоті 50 Гц з напругою 220 В.

Заміна касети з дротом може бути виконана під водою водолазом– зварником на місці роботи. Для ручного зварювання і різання використовують спеціальні тримачі, які забезпечують гідроізоляцію струмопідвідних частин від оточуючої води. Для мокрого зварювання і різання використовуються стандартні джерела живлення з відповідною формою зовнішньої вольт-амперної характеристики і підвищеною напругою холостого ходу для стабільного збудження дуги.

Для зварювання на підвищених глибинах розроблено автомат АДСП-200 [2]. Автомат являє собою трубчасту металоконструкцію (рис. 4.6), що поєднує модуль подачі електродного дроту, модуль обертання зварювальної головки (механізму подачі), модуль контактних вузлів.

Підводне зварювання застосовується при будівництві і ремонті портів споруд, ліквідації на плаву навігаційних і корозійних ушкоджень суден без наступної постановки їх у док, відновленні підводних трубопроводів різного призначення максимальним діаметром до 1020 мм і робочим тиском до 5,0 МПа, ремонті елементів конструкцій гідроелектростанцій,

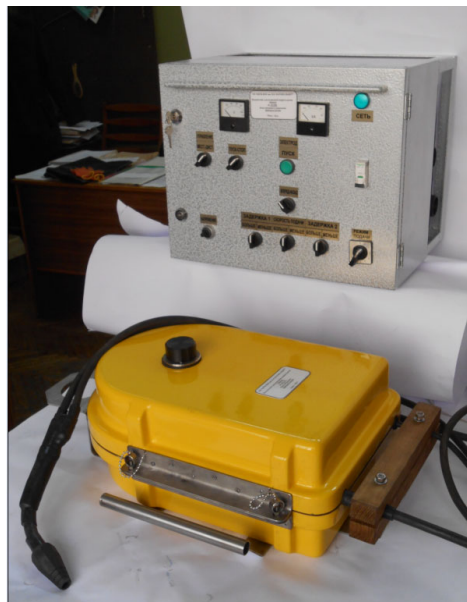


Рис. 4.5. Напівавтомат ПШ-160 для зварювання і різання під водою порошковим дротом

#### 4. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ І СПОРІДНЕНІ ПРОЦЕСИ...

будівництві і ремонті водозаборів, виконанні аварійно-рятувальних операцій та інших робіт. Сьогодні зварювання під водою вийшло за рамки ремонтних технологій і знайшло широке застосування при будівництві. Це і створення плавучих мегаконструкцій – аеродромів, платформ для видобутку нафти і газу, нафто- і газосховищ, – будівництво мостових переходів тощо.



Рис. 4.6. Автомат для підводного зварювання АДСП-200

Практичне використання розробок ІЕЗ почалося в 1969 р. при ремонті водоводу діаметром 1020×12 мм зі сталі 09Г2, прокладеного через р. Дніпро на глибині 12 м. Через два роки в 1971 р. за допомогою підводного зварювання порошковим дротом уперше було виконано ремонт підводної частини корпусу середнього рибальського траулера-рефрижератора, що одержав пробоїну у льодах Берингового моря. Після перевірки якості ремонту траулер було допущено до подальшого плавання без постановки в док.

Зварювання під водою порошковим дротом використано при побудові плавучої платформи "Приразломная" довжиною 126 м для з'єднання на плаву чотирьох секцій (загальна довжина трипрохідного кутового шва склала більше 800 м), побудові Подільсько-Воскресенського мостового переходу через р. Дніпро (м. Київ), для зварювання підводної частини опор. Загальна довжина трипрохідного кутового шва склала більше 10000 м.

В Україні накопичено значний досвід підводних робіт з використанням зварювання та різання. За допомогою підводного механізованого зварювання відремонтовано підводні переходи трубопроводів, гідро-

технічні споруди, проведено реконструкцію глибоководних водо-відбірників тощо. Проведення таких робіт із застосуванням зварювання та різання є актуальним і сьогодні.

## 4.2. Зварювання та споріднені технології в космосі

Освоєння людством космічного простору стало потужним імпульсом для розвитку різних галузей науки і техніки, зокрема матеріалознавства, зварювання та споріднених технологій [31, 61]. Вивчення космічного простору неможливе без створення в космосі великогабаритних заселених космічних систем, станцій та баз, розрахованих на тривалу роботу людей. Для створення таких об'єктів необхідно застосовувати технології з'єднання різноманітних космічних конструкційних матеріалів, таких, як алюміній, титан, магній, їх сплави, високолеговані та жароміцні сталі, електротехнічні та нові матеріали тощо. Найбільш перспективними технологіями обробки та з'єднання матеріалів у космічних умовах є *зварювання, паяння, різання та напилення у вакуумі* [61].

У жовтні 1969 р. на космічному кораблі "Союз-6" було проведено перший експеримент зі зварювання і різання металів, який по суті поклав початок космічних технологій. У 1973–1974 рр. експеримент по плавленню і зварюванню металів було виконано в США на орбітальній лабораторії "Скайлеб". У 1975 р. при спільному польоті космічних кораблів "Союз-Аполлон" також виконано ряд технологічних досліджень з металами і неметалічними матеріалами в рамках програми "Універсальна електропіч" [31].

### 4.2.1. Особливості космічного середовища

*Основними відмінностями космічного середовища від земного, які в тій або іншій мірі впливають як на технологічні процеси, так і на умови функціонування пристроїв та діяльності операторів-космонавтів, є: невагомість (мікрогравітація), космічний вакуум, існування різких світлотіньових границь, підвищена агресивність космічного середовища, що обумовлена високою концентрацією атомарного та іонізованого кисню, вакуумне ультрафіолетове випромінювання Сонця, вплив на матеріали та їх з'єднання протонів та електронів радіаційних поясів Землі, а також вплив мікрометеоритних частинок природного та штучного походження* [31].

У зв'язку з впливом градієнта гравітаційного поля Землі, функціонуванням різноманітних агрегатів, нерівномірним розподілом маси космічного корабля, обертанням його навколо центра мас тощо на космічному кораблі ніколи не реалізується стан, коли сили, що діють на об'єкт, дорівнюють

#### 4. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ І СПОРІДНЕНІ ПРОЦЕСИ...

нулю. Тому звичайно застосовується термін "мікрогравітація", що характеризує стан об'єкта, при якому сума всіх сил, що діють на об'єкт у космічних умовах, набагато менша, ніж на Землі. Цей стан оцінюють за допомогою коефіцієнта, який є співвідношенням прискорення ( $g$ ) тіла під дією сили, до прискорення вільного падіння на поверхні Землі ( $g_0$ ). Коефіцієнт  $g/g_0$  знаходиться в інтервалі  $10^{-7} \dots 10^{-5}$  для об'єктів, що вільно рухаються в космічному просторі,  $10^{-6} \dots 10^{-2}$  – для об'єктів, які закріплені на борту космічного корабля, та може короткочасно зростати до  $5 \cdot 10^{-1}$  при маневрах космічного апарата.

Існування мікрогравітації призводить до різких змін характеру перебігу фізичних процесів у рідких і газових середовищах та багатофазних системах, що мають рідку, тверду та газову фази. При цьому істотно зменшується гравітаційна конвекція та різко збільшується роль хімічної і термокапілярної конвекції, практично повністю відсутній розподіл фаз за рахунок різниці густини речовин, значно зростає вплив сил поверхневого натягу та адгезії. Тепло- та масообмін в умовах мікрогравітації визначаються процесами теплопровідності та дифузії. Мікрогравітація істотно впливає також на дії оператора-зварника.

Тиск залишкової атмосфери у діапазоні висот 250...500 км дорівнює приблизно  $5 \cdot 10^{-4}$  Па. Такий тиск широко застосовують при зварюванні і споріднених технологіях у земних умовах. Особливість космічного вакууму полягає в дуже великій (миттєвій) швидкості видалення газів, які утворюються у ході процесу, та суттєвій відмінності складу газового середовища в земному та космічному вакуумі. Насамперед, у космічному вакуумі дуже великий вміст атомарного та іонізованого кисню. Наприклад, при висоті польоту близько 260 км в  $1 \text{ см}^3$  космічної атмосфери сумарна кількість атомів та іонів кисню дорівнює  $(2,1 \dots 2,5) \cdot 10^9$ , а при зростанні висоти польоту до 500 км –  $(0,39 \dots 1,7) \cdot 10^8$ .

Потрібно враховувати також те, що космічний простір є повністю відкритим. Тому застосування способів зварювання, в яких використовуються пари або гази, є проблематичним.

За рахунок великої швидкості переміщення космічних об'єктів у відкритому космосі виникає певний градієнт тиску між лобовою та тильною сторонами корабля. На лобовій стороні відбувається ущільнення середовища, що призводить до зростання тиску на величину до  $10^2$  Па від оточуючого середовища. На тильній стороні, навпаки, виникає зниження тиску на величину до  $10^3$  Па. Це явище має назву "вакуумна тінь" і його також необхідно враховувати при розробці технологій зварювання в космосі.

Існування в космосі різких світло-тіньових границь має два прояви та пов'язане з відсутністю густої атмосфери, що ускладнює процеси

теплообміну. При обертанні навколо Землі космічні об'єкти за один оберт двічі переходять з освітленої Сонцем зони до тіньової і навпаки. При цьому на освітленій Сонцем стороні космічного апарата поверхня може нагріватися до 150 °С, а іноді і більше, у той час як на тіньовій поверхні температура може знижуватися до –120 °С. Близько розташовані освітлені та тіньові поверхні можуть мати великий градієнт температур, оскільки теплообмін відбувається лише за рахунок випромінювання з поверхні та теплопровідності матеріалу. Систематичне термоцикування зварних конструкцій при обертанні навколо Землі супроводжується термомодеформаціями і термічними напруженнями, що може суттєво впливати на тривалість експлуатації космічних об'єктів у відкритому космосі.

*Підвищена агресивність космічного середовища пов'язана з високим вмістом у космічному вакуумі атомів та іонів кисню, що спричиняє підвищення концентрації розчинного кисню в метали.* Це може суттєво погіршити властивості зварного з'єднання. Ще більше впливає кисень на матеріали, які знаходяться в паровій фазі в процесі нанесення покриття. Процеси окиснення істотно прискорюються під дією ультрафіолетового випромінювання Сонця. При цьому відбувається інтенсивне корозійне руйнування поверхні як основного матеріалу, так і зварних та спаяних з'єднань.

*Слід відзначити також вплив на матеріали мікрочастинок природного походження, таких, як мікрометеоритний та космічний пил.* Ці частинки мають велику кінетичну енергію, яка при їх зустрічі з поверхнею космічних апаратів перетворюється на теплову та механічну. Зіткнення з такими частинками призводить до структурних перетворень у метали, а також різноманітних дефектів та мікротріщин. Під впливом термоцикування, окиснення та опромінення ці дефекти збільшуються і розвиваються. Їх накопичення може суттєво зменшити міцність від утомленості конструкційних матеріалів і з'єднань та призвести до руйнування конструкції.

Сучасний стан розвитку космонавтики після ХХ століття почався зі створення орбітального комплексу – Міжнародної космічної станції, розрахованої на експлуатацію протягом трьох років, а також розробки проєктів освоєння Місяця та пілотованих польотів на Марс. Загальною ознакою всіх проєктів є те, що кожний з них потребує побудови і технічного обслуговування при подальшій експлуатації складних конструкцій безпосередньо в умовах космосу. На відміну від наземних умов, вони пов'язані з автономністю функціонуючих там апаратів і конструкцій, причому ступінь автономності підвищується з віддаленням космічного апарата від поверхні Землі.



#### 4. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ І СПОРІДНЕНІ ПРОЦЕСИ...

---

Одним з перспективних видів робіт, необхідних при побудові та експлуатації орбітальних комплексів і баз на Місяці, є з'єднання та ремонт конструкцій, фрагментів металевих елементів, які використовуються для створення різноманітних космічних об'єктів. Розміри таких конструкцій можуть сягати кількох десятків метрів, а доставити їх в готовому вигляді на орбіту практично неможливо, тому монтаж і з'єднання необхідно буде виконувати безпосередньо в космосі. При цьому з'єднання окремих елементів або ремонт за допомогою зварювання, без сумніву, має переваги щодо одержання гарантованої порівняно з фланцевими різьбовими, пресовими чи іншими з'єднаннями.

Проблема зварювання металевих елементів різноманітного функціонального призначення перш за все є також актуальною при проведенні ремонтних робіт на борту Міжнародної космічної станції, а також при створенні різних конструкцій безпосередньо в космічних умовах. Окрім того, сьогодні існують проекти міжпланетних пілотованих кораблів, які будуть знаходитися в автономному польоті декілька років. Окремі їх блоки будуть здійснювати посадку на планети та злітати з них. Оснащення таких кораблів високонадійним універсальним обладнанням для зварювання і споріднених технологій – це одна з основних умов їх безвідмовної роботи протягом всього польоту.

##### ***4.2.2. Аналіз способів зварювання щодо можливості їх використання в космосі***

При виборі способів зварювання в космосі необхідно враховувати як загальні вимоги до зварювання, так і специфічні космічні вимоги: *найвищу надійність з'єднань, безпечність, малу енергоємність, мінімальні масу та габарити обладнання.*

Способи зварювання, що не пов'язані з наявністю великої кількості газів і розплавленого металу в робочій зоні, зокрема дифузійне та холодне зварювання, зварювання вибухом, магнітно-імпульсне та контактне, придатні для використання в космосі, але сфера застосування цих способів обмежена їх малою універсальністю. Способи контактного та магнітно-імпульсного зварювання, крім того, пов'язані з існуванням потужних магнітних полів та необхідністю громіздкого устаткування. Зварювання тертям також вимагає наявності громіздкого обладнання і застосування суттєвих механічних зусиль до з'єднуваних деталей, що є небажаним у безопорному просторі. Ультразвукове та високочастотне зварювання характеризуються великим енергоспоживанням, малою універсальністю, високим рівнем акустичних та електричних перешкод.

Найбільш перспективними способами зварювання в космосі є поширені в промисловості методи зварювання плавленням з використанням таких джерел теплоти, як *електрична дуга, плазма та електронний промінь*. Застосування в космосі світлового променя та лазерів вимагає складних систем спостереження за розташуванням Сонця, характеризується низьким ККД та запиленням оптичних приладів парами розплавлених матеріалів.

Дугове, плазмове та електронно-променево зварювання були всебічно досліджені в ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Їх порівняльні характеристики за розподілом електричної енергії, яку вони споживають, показано на рис. 4.7 [61].

Завдяки тривалим дослідженням ІЕЗ ім. Є.О. Патона була створена та в 1969 р. випробувана на космічному кораблі "Союз-6" перша автоматична зварювальна установка "Вулкан". Вона передбачала використання в космосі зварювання електричною дугою низького тиску плавким електродом, стиснутою дугою низького тиску з порожнім катодом та електронним променем.

Спроба зварювання стиснутою дугою з порожнім катодом не дала позитивних результатів, оскільки розряд не забезпечував розплавлення металу товщиною 1 мм. Зварювання дугою низького тиску плавким електродом та електронним променем показало стабільність процесів, хоча отримати якісні шви не вдалося через нерівномірність руху робочого стола. Новий зразок автоматичної зварювальної установки "Вулкан-2" передбачав лише два способи зварювання – електронно-променево та вакуумно-дугове зварювання плавким електродом.

Дослідження показали, що при електродуговому зварюванні в космосі тиск парів металу недостатній для існування локалізованого розряду. Дуга характеризується наявністю великих активних плям, які блукають на поверхнях електродів, та низькою проплавляючою дією. В умовах мікрогравітації краплі металу на плавкому електроді можуть досягати великих розмірів. Найбільш ефективним способом керування переносом

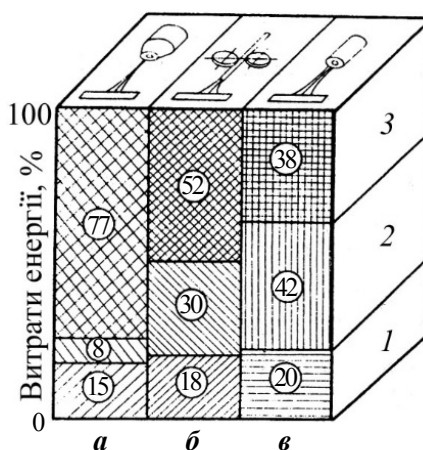


Рис. 4.7. Розподіл електричної енергії між силовим джерелом живлення і кабелями (1), інструментом (2) та деталлю (3) при електронно-променевому (а), дуговому (б) і плазмовому (в) зварюванні в умовах космічного вакууму та мікрогравітації

#### 4. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ І СПОРІДНЕНІ ПРОЦЕСИ...

електродного металу є зварювання модульованим струмом у вигляді окремих імпульсів.

До початку 80-х років ХХ століття було визначено *оптимальне джерело нагрівання – електронний промінь*. Найбільш перспективним методом зварювання було визнано електронно-променеве зварювання, яке має такі переваги: раціональне використання космічного вакууму; можливість з'єднання практично всіх матеріалів, що використовуються в космічній техніці, а іноді і різнорідних; використання великої частки енергії (до 80 %) для нагрівання виробу; можливість плавного регулювання густини енергії за рахунок фокусування електронного променя; малі розміри та маса обладнання. Слід відзначити також універсальність електронно-променевого джерела теплоти. Його можна використовувати для зварювання, різання, паяння, напилення та термічної обробки.

##### **4.2.3. Електронно-променеве обладнання та його використання в космічних умовах**

Для ручного виконання технологічних процесів у відкритому космосі в ІЕЗ ім. Є.О. Патона було створено в липні 1984 р. та випробувано у відкритому космосі за бортом орбітальної станції "Салют-7" універсальний ручний електронно-променевий інструмент (УРІ). В ньому було використано дві діодні пряморозжарювані електронно-променеві гармати, вилиті з високовольтним джерелом живлення, до якого приєднана рукоятка з низьковольтним кабелем від первинного джерела живлення і системи керування процесом. Це дало можливість відмовитися від високовольтного кабелю з метою підвищення безпеки, але значно збільшило масу інструмента – до 5,5 кг. Потужність електронного променя на виході з гармати не перевищувала 0,6 кВт.

У травні 1986 р. було проведено повторні експерименти в космосі з цим же інструментом. Було виконано електронно-променеве зварювання, різання та паяння на об'ємних фрагментах фермових конструкцій.

Досвід роботи з інструментом показав його ефективність, але він потребував доробок і модифікації. Його основними недоліками були мала потужність, великі габарити і маса, що створювало проблеми при зварюванні алюмінієвих сплавів і незручності в роботі відповідно.

Надалі на базі УРІ було розроблено апаратуру "Універсал", яка в 1991 та 1992 рр. успішно пройшла декілька серій випробувань на американській літаючій лабораторії КС-135 і була рекомендована для проведення в 1997 р. міжнародного космічного експерименту зі зварювання і спорідненим технологіям на борту американського космічного корабля "Коламбія". В апаратуру "Універсал", порівняно з УРІ, було внесено суттєві

зміни, які полягають у збільшенні в 2,5 разу вихідної потужності електронного променя, встановленні однієї електронної гармати з катодним резервуванням, що дозволяє переходити з однієї операції до іншої, замінюючи інструмент, в оснащенні базового інструменту для зварювання, паяння, різання та нанесення покриттів методом вакуумного випаровування і конденсації. Загальний вигляд апаратури "Універсал" наведено на рис. 4.8.

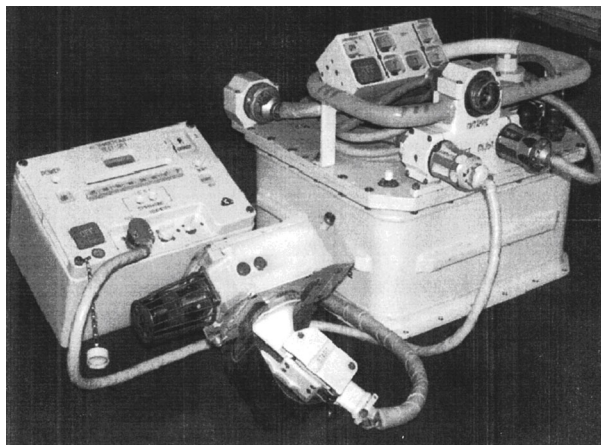


Рис. 4.8. Загальний вигляд апаратури "Універсал"

Дослідження показали, що електронно-променеве зварювання металів малих товщин у космосі мало відрізняється від наземного. Космічний вакуум сприяє якісному зварюванню, але може призвести до випаровування легких металів. Концентрація кисню дещо збільшується. Мікрогравітація є причиною підвищеної небезпеки утворення пор та несплавлень, викликаних оксидними вклученнями. Для попередження цих дефектів рекомендується використання електронного променя модульованої потужності з амплітудою сили струму від 20 до 80 % номінального значення [31, 61].

Електронно-променеве зварювання дозволяє виконувати в космосі всі типи зварних з'єднань. Механічні властивості з'єднань при правильно вибраній технології не гірші, ніж при зварюванні в наземних умовах. Макро- та мікроструктура зварних з'єднань істотних відмінностей не мають. Небезпека утворення пропалів при зварюванні в космосі значно менша, оскільки немає витікання зварювальної ванни під дією сили тяжіння. Це полегшує заварювання отворів та виконання ремонтних зварювальних робіт при підвищених зазорах.

Відсутність сили тяжіння ускладнює різання металів. Під дією поверхневих сил розплавлений метал стягується на більш холодні ділянки крайок, що робить їх непридатними для зварювання. Для різання

#### 4. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ І СПОРІДНЕНІ ПРОЦЕСИ...

використовують максимально сфокусований електронний промінь та примусове охолодження однієї з крайок для стягування на неї розплавленого металу.

Основні проблеми паяння в космосі пов'язані з вибором припоїв. Оскільки при малій гравітації роль поверхневих сил зростає, то використання припоїв, які добре змочують з'єднувані матеріали, забезпечує високу якість з'єднань. Нагрівання деталей проводиться розфокусованим променем.

Обсяг досліджень, виконаних ІЕЗ ім. Є.О Патона з 1965 до 1990 р. показано на рис. 4.9.

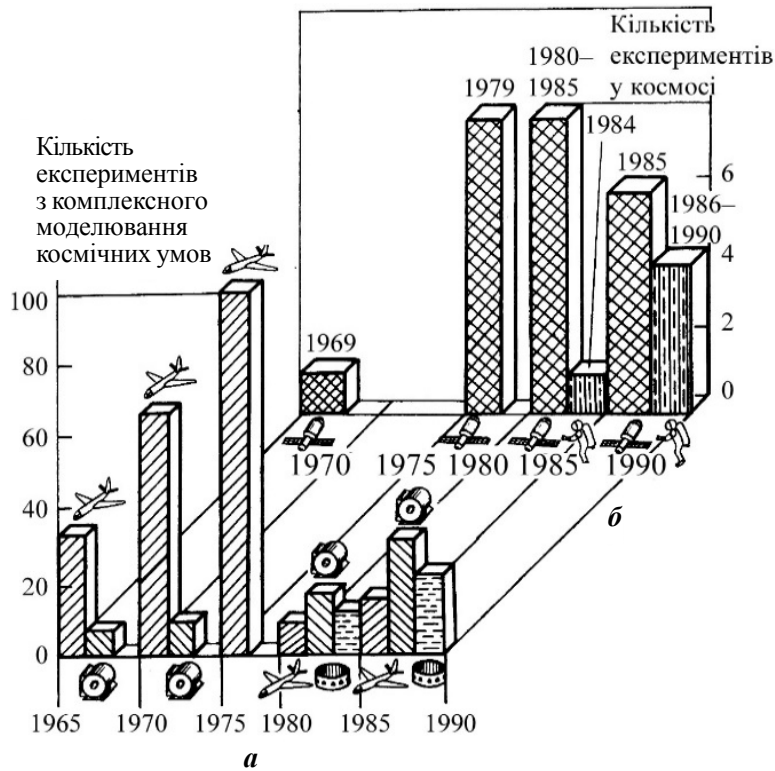


Рис. 4.9. Наземні дослідження (а) та космічні експерименти (б) зі зварювання, які виконані в ІЕЗ ім. Є.О. Патона протягом 1965–1990 рр.:  
 ▨ – випробування в літаючій лабораторії; ▩ – випробування у вакуумній камері; ▧ – випробування в гідробасейні; ▨ – експерименти всередині космічної станції; ▩ – експерименти у відкритому космосі

Виконані дослідження та набутий досвід показують, що зварювання і споріднені технології забезпечують виготовлення, монтаж та ремонт великогабаритних конструкцій у космосі. При цьому можливе їх повне

виготовлення в космосі або виготовлення на Землі та розгортка чи складання з окремих елементів у космосі [31, 61]. Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України займає лідируючі позиції в світі з розробок та застосування обладнання для зварювальних і споріднених технологічних процесів в космосі, оскільки станом на сьогодні не відомі вітчизняні та зарубіжні наукові організації, які здійснюють аналогічні розробки та дослідження. Накопичений значний досвід проектування і виготовлення інструментів, а також різноманітного обладнання для зварювання та інших робіт як у відкритому космосі, так і всередині космічної станції. Тому доцільно використовувати цей досвід при створенні ручного електронно-променевого інструменту для зварювання та споріднених технологій, який може застосовуватися при проведенні ремонтних і монтажних робіт у відкритому космосі.

#### *4.3. Зварювання та споріднені процеси в медицині*

Розглянуті в попередніх розділах спеціальні способи зварювання інтенсивно розвивалися в другій половині ХХ і в ХХІ ст., але в промисловості і сьогодні найбільш поширене електродугове зварювання. Тому, коли мова йде про зварювання в медицині, то в уявленні більшості людей виникає асоціація з електричною дугою та її використанням для лікування, але сьогодні рівень розвитку нових процесів настільки високий, що дозволяє їх застосовувати в різних галузях медицини [62].

На сьогодні в Україні використання можливостей, що надаються новими процесами зварювання та обробки різних матеріалів, в тому числі біологічних тканин, є одним з пріоритетних напрямків наукових досліджень ІЕЗ ім. Є.О. Патона з метою поліпшення здоров'я людини та місця її існування. Вони включають у себе[71]:

- високочастотне (ВЧ) зварювання живих тканин для з'єднання і відновлення життєдіяльності органів людини і тварин;
- гіпертермічні способи зварювання, різання та обробки живих біологічних тканин;
- використання матеріалів з ефектом пам'яті форми для виготовлення імплантатів, протезів і спеціальних хірургічних інструментів;
- мікроплазмове напилення біокерамічних покриттів на ендопротези;
- парофазну електронно-променеву технологію отримання композиційних наноматеріалів для цілеспрямованого транспортування і посилення дії лікарських препаратів у живому організмі;
- паро-плазмові технології переробки медичних відходів.

##### **4.3.1. Високочастотне зварювання живих тканин**

Історію електрохірургії зазвичай пов'язують з відкриттям теплових властивостей електрики на початку XVIII століття, а також з винаходом Беккерелем електроножа, кінець дроту якого нагрівався з подальшим припіканням тканин.

Перші свідчення застосування високочастотного електро-коагуляційного обладнання в медицині пов'язані з іменами d'Arsonval, Tesla, Cushing, Bovie і відомі понад 100 років. Протягом багатьох років випускалася та вдосконалювалася апаратура, яка дозволяла руйнувати пухлини, видаляти пошкоджені тканини, коагулювати поверхні ран та ін. У даний час на світовому ринку представлені численні високочастотні електрохірургічні апарати, що випускаються такими провідними виробниками, як "Valleylab", підрозділ корпорації "Covidien" (США), "Ethicon", підрозділ компанії "Johnson & Johnson" (США), KLS Martin Group і ERBE (Німеччина) та ін. Випускаються подібні апарати і в Україні, наприклад ЗАТ "НДІ прикладної електроніки" (Київ). Однак вирішити проблеми отримання надійних з'єднань живих біологічних тканин і відновлення життєдіяльності органів людини і тварин способами електрохірургії стало можливим тільки в останні роки, використовуючи технології високочастотного зварювання.

Зварювання живих тканин стало пріоритетним у спільній роботі фахівців ІЕЗ ім. Є. О. Патона з рядом медичних установ України, розпочатій ще на початку 90-х років XX століття. Перші експерименти у цьому напрямку було проведено в 1993 р. Вони показали принципову можливість з'єднання розрізу живої тканини при певних умовах. Сьогодні спосіб високочастотного зварювання живих тканин (ВЧЗЖТ), який розроблено в ІЕЗ ім. Є. О. Патона в тісній співпраці з Міжнародною асоціацією "Зварювання", компанією CSMG (США) і провідними медичними організаціями України, показав свою ефективність і успішно використовується в медичній практиці вже понад 10 років.

За цей час освоєно понад 150 різних хірургічних методик і успішно виконано понад 100 тисяч хірургічних операцій у таких галузях, як загальна і абдомінальна хірургія, травматологія, пульмонологія, проктологія, урологія, мамалогія, оторіноларингологія, гінекологія, офтальмологія та ін. За відгуками хірургів, даний спосіб вельми перспективний при трансплантації різних органів. На сьогодні в Україні на апаратах, розроблених в ІЕЗ ім. Є. О. Патона, виконується в середньому від 15 до 20 тисяч операцій на рік.

Надзвичайно перспективним є використання нової техніки і технологій у ветеринарії як для хірургічного лікування та обробки домашніх і диких тварин (видалення пухлин, кастрація тощо), так і для санітарної обробки і стерилізації бродячих тварин.

Спосіб ВЧЗЖТ забезпечує:

- безкровне, швидке, зручне для хірурга і малотравматичне для пацієнта виконання оперативних втручань, надійний гемостаз;
- зниження крововтрат більш ніж на 50 %;
- скорочення тривалості операцій на 20...50 %;
- високу абластичність проведення операцій;
- відсутність нагноєння;
- швидку і повноцінну післяопераційну реабілітацію;
- можливість хірургічного лікування хворих, які вважалися неоперабельними.

Переваги ВЧЗЖТ підтвержені численними відгуками провідних хірургів, а також неодноразово відзначалися в доповідях на конференціях зі зварювання живих тканин, які регулярно проводяться в ІЕЗ ім. Є.О. Патона.

Для подальшої інтенсифікації робіт у галузі електрозварювання живих тканин і відповідно до спільного рішення Головного управління охорони здоров'я та медичного забезпечення Київської міської держадміністрації, Національної академії наук України, Національної академії медичних наук України та Національної медичної академії післядипломної освіти ім. П.Л. Шупика в 2011 р. на базі Київської міської клінічної лікарні № 1 створено Київський міський лікувальний навчально-впроваджувальний центр електрозварювальної хірургії та нових хірургічних технологій (керівник С.Є. Подпряттов).

Поширення апаратів (більше 150) конструкції ІЕЗ ім. Є.О. Патона для ВЧЗЖТ охоплює практично всі регіони України, а також деякі країни ближнього і далекого зарубіжжя. Апарати застосовуються в Російській Федерації та Болгарії, перша партія апаратів поставлена в Китай.

Інтерес до розробок виявляють такі країни, як США, Індія, В'єтнам, Польща, Македонія, країни Балтії та ін. [71].

Останніми роками західні виробники в переліку функціональних можливостей свого устаткування також почали вживати термін "зварювання". Однак, слід відзначити, що ця функція відноситься, в основному, лише до процедури перекриття судин, а за кількістю і різноманітністю хірургічних методик з використанням високочастотного електрозварювання Україна, безумовно, є світовим лідером.

Практичною основою для реалізації процесу ВЧЗЖТ, як і будь-якої іншої технології, служать відповідні обладнання та інструментарій. Починаючи з перших апаратів, розроблених ще в середині 90-х рр. ХХ століття, на сьогодні в ІЕЗ ім. Є.О. Патона створено широкий спектр спеціалізованої апаратури. Випускаються і реалізуються апарати ЕК-300М1 різних модифікацій (розробка минулих років) і новий апарат ЕКВЗ-300 "ПАТОНМЕД" для зварювання живих тканин.



#### 4. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ І СПОРІДНЕНІ ПРОЦЕСИ...

---

Універсальний апарат ЕКВЗ-300 пройшов клінічні випробування, державну реєстрацію та успішно використовується в хірургічній практиці більш ніж у 20 медичних установах України. Ці апарати поставлено в Китай для оцінки та демонстрації нового способу з метою створення спільного виробництва даної апаратури як для китайського ринку, так і ринків інших країн.

При розробці апарата ЕКВЗ-300 враховано досвід, накопичений у ході експлуатації раніше розробленого обладнання, і рекомендації та пропозиції хірургів різних спеціальностей. Такий апарат забезпечує роботу в наступних режимах: різання, коагуляція, автоматичне зварювання. Є можливість вибору алгоритмів роботи і робочих параметрів процесу залежно від видів операцій і вимог хірургів. Можливі адаптація, зміна і введення додаткових програм за бажанням користувача. Апарат працює на двох робочих частотах: 66 і 440 кГц з контрольованою потужністю. Передбачено одночасне підключення двох інструментів за вибором хірурга. Апарат комплектується базовим набором електрохірургічних інструментів (пінцети і затискачі). Можлива комплектація додатковими інструментами для відкритої і лапароскопічної хірургії.

Даний апарат працює з усіма інструментами для ВЧЗЖТ, створеними в ІЕЗ ім. Є.О. Патона на сьогодні. Він успішно випробуваний при проведенні операцій у різних областях хірургії, включаючи загальні порожнинні операції, пульмонологію, урологію, офтальмологію тощо. Проводяться операції зі зварюванням (перекриттям) судин, резекцією легень і печінки, видаленням нирки, кишкового анастомозу і багато інших.

У науково-технічному комплексі "Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона" створено виробництво, що дозволяє як повністю задовольняти потреби України в даному виді обладнання, так і поставляти його на експорт.

Подальша розробка обладнання для зварювання живих тканин, що складається з власне апарата (електронного блока) та відповідного інструментарію зі з'єднувальними кабелями, пов'язана перш за все з удосконаленням самих апаратів, підвищенням їх надійності, ергономічності, зручності в роботі й обслуговуванні та адаптації до потреб хірургів. На даному етапі необхідна розробка нового програмного продукту, орієнтованого на окремі хірургічні методики і потреби користувачів, а також нових систем автоматичного керування процесом. Необхідно також створювати нове спеціалізоване обладнання для окремих галузей хірургії (офтальмологія, серцево-судинна хірургія, нейрохірургія та ін.).

Вкрай потрібна розробка мобільних систем, призначених для автономної роботи (станції швидкої допомоги, санітарна авіація, медицина

### 4.3. Зварювання та споріднені процеси в медицині

катастроф тощо). Прототипом такого обладнання можуть бути нові, створені на базі ЕКВЗ-300 апарати ЕКВЗ-300М (рис. 4.10,*а*) і ЕКВЗ-300МДУ (*б*).

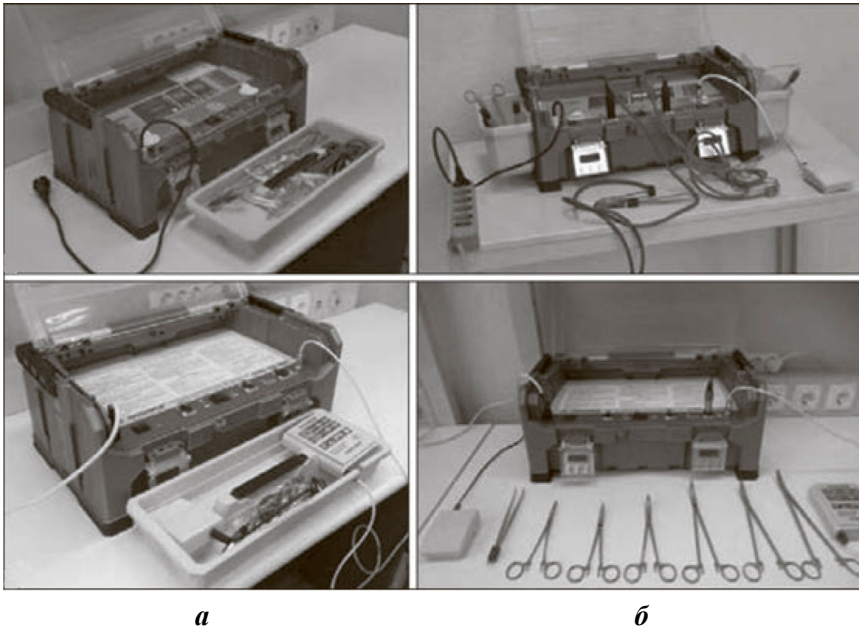


Рис. 4.10. Універсальні мобільні апарати для високочастотного зварювання живих тканин з вбудованим (*а*) і виносним (*б*) пультом керування

Не менш важливий для ВЧЖЗТ відповідний інструментарій. На сьогодні розроблені і випускаються багато типів електрозварювальних хірургічних інструментів, в основному базових. Все більше використовуються інструменти різного типу для лапароскопічної хірургії та численні інструменти, розроблені для потреб отоларингології, але випуск нового інструменту потрібної номенклатури і в необхідних обсягах ще не задовольняє існуючих потреб.

Одночасно з розробкою обладнання в ІЕЗ ім. Є.О. Патона при тісному контакті з провідними медичними та науково-технічними установами України та інших країн безперервно ведуться роботи щодо дослідження поведінки живих тканин різних типів при проходженні через них струмів високої частоти, розробки на підставі даних досліджень нових алгоритмів роботи обладнання і створення нових хірургічних методик.

У результаті досліджень, проведених спільно з Київським центром електрозварювальної хірургії (С. Є. Подпрягов і С. Г. Гичка), вперше встановлено особливості реструктуризації живих тканин і утворення зварного з'єднання при дії високочастотного струму, який проходить через них. Визначено наступні фази реструктуризації:

#### 4. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ І СПОРІДНЕНІ ПРОЦЕСИ...

– відділення струмопровідних структур (білків або їх комплексів у складі колагенових і м'язових волокон, мембран тканин і внутрішньоклітинних органел) від струмонепровідних (жирів, глікозоаміногліканів як у міжтканинному просторі, так і всередині клітини);

– переорієнтація струмопровідних структур вздовж напрямку протікання струму, а струмонепровідних – поперек;

– утворення щілин між струмопровідними структурами одночасно з виникненням їх хвилястості;

– зближення струмопровідних структур і їх злиття з утворенням однорідної маси, яка і є електрозварювальним швом.

Зміни структури в стінці артерії при її перекритті зварюванням показано на рис. 4.11.

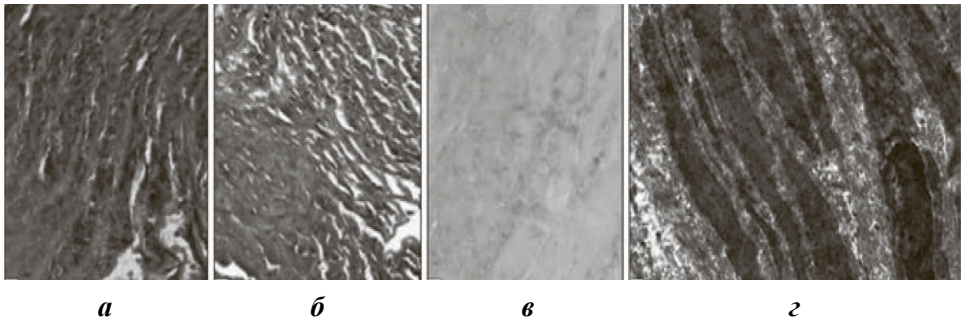


Рис. 4.11. Зміни структури в стінці артерії при її перекритті зварюванням:

*а* – переорієнтація струмопровідних структур вздовж напрямку проходження струму, а струмонепровідних – поперек;

*б* – утворення щілин і хвилястості; *в, г* – зближення і злиття струмопровідних структур з утворенням однорідної маси – зварного з'єднання

Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона спільно з Інститутом теоретичної та експериментальної біофізики, Інститутом біофізики клітини, та НДЦ "Курчатовский институт" способом рентгенівської дифракції з використанням синхротронного випромінювання проведено дослідження впливу високочастотного електрохірургічного зварювання на структури різних біологічних тканин. На основі отриманих експериментальних і клінічних даних встановлено можливість тканини, підданої дії ВЧ-зварювання, підтримувати свою життєздатність, відновлювати фізіологічні властивості і функції за рахунок процесів регенерації.

Відпрацьовані в процесі багаторічної клінічної практики робочі режими електрозварювального впливу у фізіологічному діапазоні дозволили зареєструвати структурні зміни на молекулярному і наноструктурному рівнях. Показано, що при ВЧ-зварюванні більш лабільні глобулярні

### 4.3. Зварювання та споріднені процеси в медицині

білки зазнають теплової денатурації: підвищення температури викликає структурний перехід типу "глобула-клубок", у результаті чого формуються субстанції, подібні до клею. Спосіб склеювання широко застосовується в хірургії. Для цього використовують спеціалізовані медичні клеї або білкові препарати, якими покривають місця з'єднання пошкоджених структур, наприклад альбуміном при лазерній коагуляції. Перевага способу ВЧЗЖТ (див. рис. 4.11) в тому, що вдається уникнути присутності стороннього матеріалу і проблем, пов'язаних з імунною несумісністю.

Осцилограми зміни електричних і фізичних параметрів у процесі ВЧЗЖТ показано на рис. 4.12.

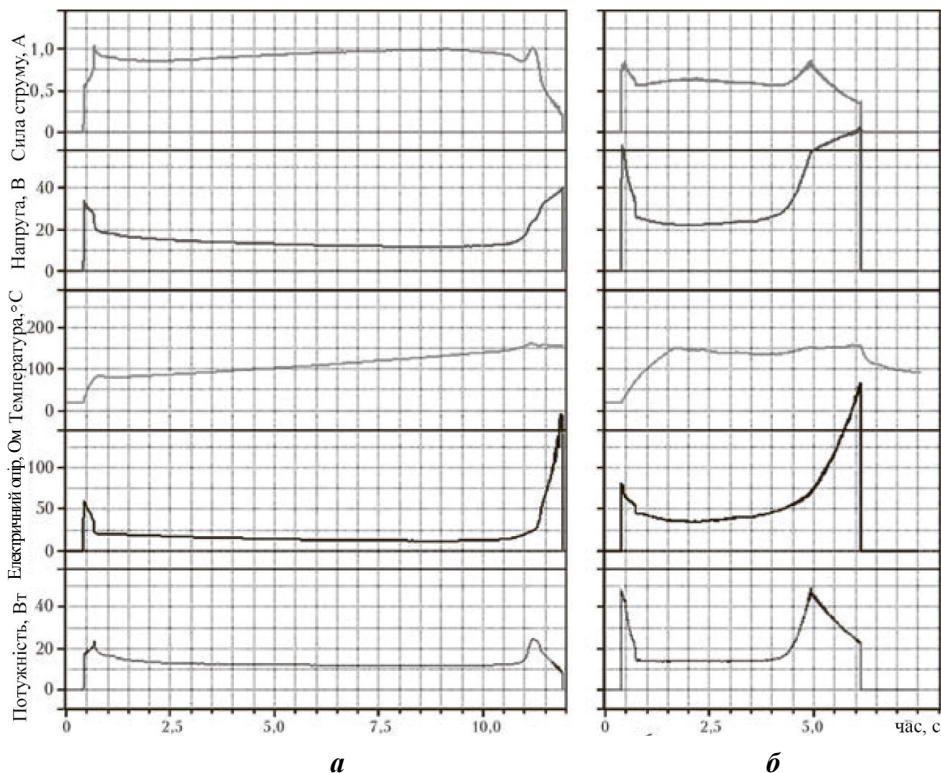


Рис. 4.12. Осцилограми середніх значень суми зварювального струму і напругення, температури в центрі зварного з'єднання, електричного опору тканини між електродами та потужності, що виділяється в тканині при зварюванні:

*а* – кишка; *б* – м'язова тканина

В останні роки в ІЕЗ ім. Є.О. Патона проведені дослідження процесу високочастотного зварювання м'яких біологічних тканин як об'єкта автоматичного регулювання. Виконано численні експерименти із записом

#### 4. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ І СПОРІДНЕНІ ПРОЦЕСИ...

і комп'ютерною обробкою електричних та фізичних параметрів процесу ВЧЗЖТ. Показано, що при проходженні електричного струму через тканину між електродами температура тканини в центрі зварного з'єднання швидко підвищується до температури коагуляції білків і денатурації клітин (60 °С), при цьому електричний опір тканини падає в 2,5–3 рази. Потім температура поступово підвищується до 150...180 °С.

Відбувається зневоднення тканини зі збільшенням її опору. Внаслідок цього поля електричного опору, електричного струму і температури стають неоднорідними. Струм переважно протікає по ділянках з більш низьким на даний момент опором. Коли вся тканина між електродами повністю зневодниться, її інтегральний опір різко зростає, що є ознакою гарантовано сформованої зварної точки і сигналом до закінчення зварювання. Подальший нагрів призводить лише до небажаної карбонізації тканини.

На основі отриманих уявлень про фізичні процеси, що проходять при зварюванні, розроблено математичну модель зварювання м'яких біологічних тканин. Виявлено фізичні і відповідні їм електричні показники, які характеризують закінчення формування якісного зварного з'єднання. Відповідно до цієї моделі розроблено алгоритм автоматичного регулювання процесу зварювання, що забезпечує гарантоване отримання зварного з'єднання в широкому діапазоні зміни властивостей тканини, що зварюється.

Розроблено принципово новий зварювальний апарат, який реалізує цей алгоритм. Параметри режиму зварювання в ньому встановлюються і підтримуються автоматично за результатами ідентифікації системою типу тканини, її стану тощо. За бажанням хірург має можливість встановлювати інтенсивність режиму зварювання – "жорсткий" або "м'який".

Ці та інші дослідження лягли в основу розробки нових алгоритмів роботи апаратів для зварювання живих тканин. У результаті використання запропонованого алгоритму досягається оптимальний вплив ВЧ-струму на оперовану тканину, що в кінцевому результаті призводить до отримання високоякісного з'єднання. Параметри процесу призначаються виходячи з умов проведення хірургічних втручань.

Конкретним результатом застосування нових алгоритмів роботи є те, що разом з лікарями Київського центру електрозварювальної хірургії з використанням стандартних апарата ЕКВЗ-300 ("ПАТОНМЕД") і інструменту в клініці досягнуто перекриття артерій діаметром до 8 мм і вен діаметром до 11 мм. Уперше досягнуто формування електрозварного шва паренхіми печінки. Отримано позитивні результати при лікуванні цукрового діабету хірургічним шляхом з використанням технології електрозварювання живих тканин у відкритому і лапароскопічному

варіантах. Відпрацьована і успішно застосовується на практиці нова технологія позаділобкової простатектомії при хірургічному лікуванні аденоми простати. Дана технологія має цілу низку переваг у порівнянні з існуючою, що дозволяє охарактеризувати її як одну з найбільш перспективних при лікуванні даного дуже поширеного захворювання.

Перспективним є застосування способів високочастотного електрозварювання в кардіохірургії. Для розширення можливостей застосування ВЧ-зварювання в зазначеній галузі хірургії та розробки відповідного обладнання було створено Міжвідомчий центр "Серцево-судинної інженерії", до якого увійшли фахівці ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ, Національного інституту серцево-судинної хірургії (НІССХ) ім. М.М. Амосова АМНУ і Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут".

У рамках цього центру ведуться роботи зі створення спеціалізованої апаратури, інструментарію та технологій: кардіохірургічного інструменту для трансмуральної абляції провідних шляхів серця, діатермокоагуляції тканин і зупинки кровотеч, інструменту для проведення кардіохірургічних операцій з одночасним різанням і коагуляцією та ін. Розроблено дослідні зразки зазначеного інструменту, які успішно пройшли випробування.

Плануються роботи з подальшого вдосконалення апаратури та інструменту відповідно до специфіки серцево-судинної хірургії, а також розробка і впровадження нових методик операційних втручань на базі НІССХ ім. М.М. Амосова та інших кардіохірургічних закладів України.

Слід окремо відзначити роботи зі зварювання живих тканин в офтальмології, що проводяться спільно з фахівцями Інституту очних хвороб і тканинної терапії ім. В.П. Філатова АМН України (м. Одеса). Так, спільно створена технологія приварювання сітківки в даний час є однією з найбільш ефективних. На сьогоднішній день в офтальмохірургічній практиці зазначеного інституту ВЧЗЖТ застосовується досить широко, зокрема під час енуклеації (видаленні очного яблука) у хворих з внутрішньоочними новоутвореннями, злоякісної вторинної неоваскулярної глаукоми та ін. У режимі "Різання" виконується відсікання прямих м'язів очного яблука від склери, перетин судинно-нервового пучка, в режимі "зварювання" – адаптація крайок кон'юнктивального розрізу.

У хірургії сітківки і склоподібного тіла ВЧЗЖТ застосовується у хворих з відшаруванням сітківки, діабетичною ретинопатією (одне з найбільш важких ускладнень цукрового діабету) і внутрішньоочними новоутвореннями.

При операціях використовуються оригінальні параметри модифікованих для офтальмології апаратів, сконструйованих в ІЕЗ ім. Є.О. Патона і спільно з інститутом ім. В.П. Філатова розроблені оригінальні інструменти.

#### 4. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ І СПОРІДНЕНІ ПРОЦЕСИ...

Виконуються експериментальні дослідження також за іншими напрямками, що дозволить підвищити ефективність лікування хворих на зляжкісні внутрішньоочні новоутворення, вторинну неоваскулярну глаукому та підвищити якість пошарової пересадки рогівки тощо.

##### ***4.3.2. Гіпертермічні способи зварювання, різання і обробки живих тканин***

У 2001 р. КБ "Південне" та ІЕЗ ім. Є.О. Патона спільно розробили плазмовий хірургічний комплекс "Плазмамед", що започаткувало розвиток в Україні нової галузі медицини – безконтактної гіпертермічної хірургії.

На першому етапі було створено апаратуру, яка за допомогою струменя низькотемпературної аргонової плазми здійснює різання паренхіматозних тканин і зупинку внутрішньораневих кровотеч. Було отримано позитивну медикотехнічну оцінку цієї апаратури і розроблено методику плазмового зварювання живих тканин кишечника і шлунка, а також спосіб з'єднання крайок ран паренхіматозних органів.

Надалі ІЕЗ ім. Є.О. Патона спільно з Національним інститутом хірургії і трансплантології ім. О.О. Шалімова (НІХТ ім. О.О. Шалімова) розробили спосіб і апаратуру для конвекційно-інфрачервоної (КІ) обробки і зварювання живих тканин. Цей спосіб відрізняється простотою, доступністю створеної для нього апаратури, а також використанням замість аргону навколишнього повітря. Новизна розробок підтверджена патентами України. Даний спосіб забезпечує надійний гемостаз, можливість формування плівок коагульованої крові на поверхні тканини, відсутність термічного пошкодження паренхіми органу, можливість безпечної роботи в області великих судин і порожнистих органів. Основні ефекти безконтактної взаємодії конвекційно-інфрачервоних потоків тепла і живих тканин показано на рис. 4.13.

Створено і випробувано дослідні зразки апаратів КІ-обробки живих тканин і інструментів до них. Для використання в польових умовах розроблено апарати ТПБ-65, ТПБ-65Б, ТПБ-65Авт та ін. Для стаціонарних операційних розроблено повнофункціональний апарат ТПБ-180 з вбудованим блоком безперебійного живлення.

Більшість апаратів може працювати автономно з використанням як джерело живлення бортову мережу автомобіля, і польові електростанції. Апарат ТПБ-200ВЧ може виконувати маніпуляції високочастотного різання і коагуляції живих тканин.

Доклінічні дослідження КІ-апаратури і методик її застосування проведено на базі НІХТ ім. О.О. Шалімова за участі фахівців Української військово-медичної академії. Дослідження в області КІ-обробки живих

### 4.3. Зварювання та споріднені процеси в медицині

тканин в хірургії показали перспективність цього способу, особливо в умовах інфекційно-ускладнених оперативних втручань. Даний спосіб було модифіковано для зупинки кровотечі і профілактики розвитку інфекції при вогнепальних пораненнях.

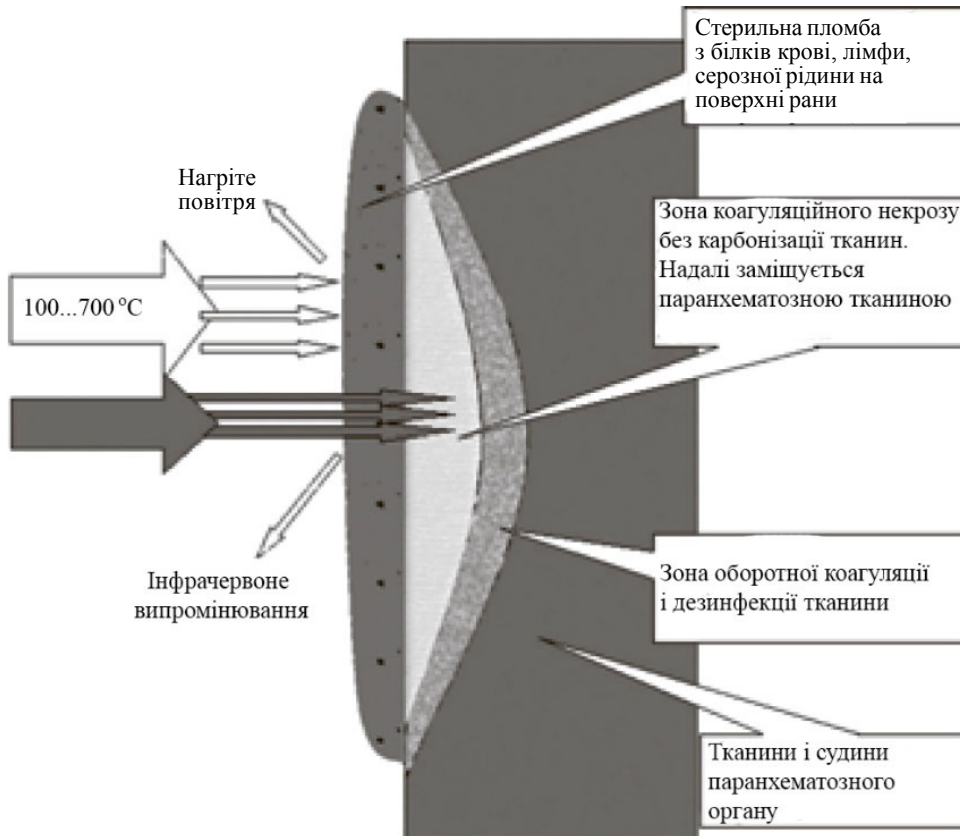


Рис. 4.13. Основні ефекти дії конвекційно-інфрачервоних потоків тепла і живих тканин

Розроблена апаратура дозволяє надати першу лікарську допомогу постраждалим в аваріях і катастрофах як в польових умовах безпосередньо на місці отримання травми, так і в стаціонарах. КІ-апаратура дозволяє провести зупинку кровотечі з паранхематозних органів, губчастих кісток і судин діаметром 1...3 мм, санацію інфікованих і хронічних гнійних ран, профілактику гнійної інфекції при бойових травмах, зварювання тканин органів шлунково-кишкового тракту, коагуляцію тканин для проведення безкровного розсічення, профілактику рецидивів і розвитку метастазів при видаленні пухлин.



#### 4. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ І СПОРІДНЕНІ ПРОЦЕСИ...

---

Створення багатофункціональних апаратів, що поєднують процеси високочастотного зварювання і КІ-обробки живих тканин, є одним з важливих завдань при розробці та впровадженні нового покоління електротермохірургічного обладнання. Перші макетні зразки такого обладнання на базі ЕК-300М1 проходять всебічні клінічні випробування. Розроблено макетні зразки КІ-інструментів для апаратів ЕКВЗ-300 "ПАТОНМЕД". Таким чином, у перспективі більшість високочастотних апаратів для зварювання живих тканин матимуть функції КІ-обробки тканин. За відгуками хірургів, поєднання зазначених процесів в одному багатофункціональному апараті дозволяє виконувати з його допомогою до 80 % стандартних хірургічних маніпуляцій.

Окремим високоперспективним напрямком робіт ІЕЗ ім. Є.О. Патона є розробка комплексних медичних технологій, спрямованих на рішення таких проблем, як реконструктивно-відновна хірургія, кардіо-судинна хірургія, офтальмологія.

Проблема реконструктивно-відновлювальної хірургії охоплює матеріали, технології, апаратуру, хірургічні методики, використовувані в ортопедії, травматології, щелепно-лицьовій хірургії, стоматології для підвищення ефективності оперативних втручань, скорочення термінів відновлення цілісності і функцій опорно-рухового апарату. Окремі напрямки стосуються також протезування, онкології, нейрохірургії і вертебрології (в частині відновлення цілісності кісток, міжхребцевих дисків, забезпечення рухливості хребта).

Комплексне використання термохірургічних технологій і нових матеріалів для остеосинтезу та протезування дозволяє проводити одноетапні реконструктивні операції без вилучення елементів остеосинтезу після відновлення кістки.

Перераховані переваги нових процесів зварювання, різання і термічної обробки живих біологічних тканин дозволяють прогнозувати їх широке застосування. У перспективі, на думку авторів, апарати для високочастотного зварювання і КІ-обробки живих тканин повинні стати незмінним атрибутом кожної операційної, кожного операційного столу.

#### ***4.3.3. Покриття для стентів, імплантанти, протези, хірургічний інструмент, біокерамічні покриття та композиційні матеріали для медицини***

До нових прийомів лікування серцево-судинних захворювань, що отримали розвиток протягом останніх 20 років, належать інвазивні методи. Вони полягають у введенні в просвіт судини конструкцій з металу (стентів), які підтримують її певний розріз. У 2000 р. в світі проведено

майже 2 млн операцій зі стентування. Прогнозоване зростання числа таких операцій становить 20...25 % щорічно. Застосування цього методу лікування стикається з проблемою можливості повернення хвороби – рестенозом. Це пов'язано з розростанням навколо стента фіброзно-сполучної тканини у вигляді капсули в результаті реакції організму на появу стента. Одне з рішень цієї проблеми полягає в створенні спеціальних покриттів для стентів.

**Магнетронне напылення покриттів на стенти.** Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона спільно з Національною академією післядипломної освіти ім. П.Л. Шупика Міністерства охорони здоров'я України та Інститутом металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України розробив склад покриттів, "невидимих" для внутрішнього середовища організму людини. Матеріалом таких покриттів було вибрано цирконій і його сплави. Покриття наносили методом магнетронного напылення на сталь 10X18H10T (пластини товщиною 0,18...0,50 мм і дріт діаметром 0,3...0,5 мм), яка широко використовується в медицині, в тому числі для виготовлення стентів. Товщина покриттів становить 3...5 мкм.

Дослідження показали, що застосування магнетронного цирконієвого покриття в 4 рази знижує реакцію живого організму на нержавіючу сталь 10X18H10T і є перспективним для використання в стентах з метою зниження ризиків рестеноза.

**Імпланти, протези і хірургічний інструмент зі сплаву з ефектом пам'яті форми.** Сплави з ефектом пам'яті форми, що деформуються при низьких температурах, при нагріванні відновлюють свою форму в результаті фазового перетворення. З усього різноманіття таких сплавів для медичного використання придатні тільки сплави на основі титану та нікелю (нітіноли або нікеліди титану), які мають високі антикорозійні властивості, близькі до властивостей чистого титану, а також необхідні характеристики біоінертності і біосумісності.

Для практичного використання в медицині дуже важливо, щоб відновлення форми проходило при температурі тіла людини, тобто від 30 до 35 °С. У той же час деформацію виробу, який при нагріванні має набути форму спіралі, перед хірургічним застосуванням, наприклад витягування його в лінію, бажано проводити при охолодженні до температури проточної води, тобто приблизно при 10 °С. Таким умовам відповідають розроблені Інститутом металофізики ім. Г.В. Курдюмова та Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України нові сплави з пам'яттю форми на основі титану і нікелю, в яких температурний діапазон фазового перетворення відповідає умовам безпечного медичного застосування.

#### 4. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ І СПОРІДНЕНІ ПРОЦЕСИ...

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено конструкцію і виготовлено імпланти та інструменти з цих сплавів, зокрема екстрактори, дужки, емболії, стенти тощо.

Екстрактор призначений для видалення каменів або інших перешкод з трубчастих органів людини. Використання нітінолу з додатковим нагріванням до температури приблизно 40 °С дозволяє підвищити жорсткість інструмента, що сприяє збільшенню діаметра трубчастого органу людини для безперешкодного проходження інструментом вигинів полегшує роботу хірурга. Нова конструкція екстрактора пройшла успішне випробування при операції з видалення каменів із сечоводу.

При операціях опорно-рухового апарату, черепно-мозкових і стоматологічних операціях для з'єднання уламків кісток застосовуються спеціальні скоби. Використання сплаву з ефектом пам'яті форми дозволяє значно спростити їх установку порівняно з відомими зразками з нержавіючої сталі.

Для лікування онкологічних захворювань різних органів застосовуються емболи, виготовлені з нітінолу, які легко проводяться по кровоносних судинах і закріплюються в необхідному місці.

Стенти нової конструкції з нітінолу мають підвищену жорсткість в радіальному напрямку завдяки розробленій трубчастій формі і достатню осьову гнучкість для проходження по кровоносних судинах до місця установки. Особливістю такого стента є також пориста поверхня, що дозволяє зберегти велику порцію фармакологічних засобів для боротьби з рестенозом.

Для жовчних протоків розроблено стенти з нітінолу, які призначені для підвищення якості життя після онкологічних операцій. По суті вони є протезами жовчних протоків на ділянці, де пройшло видалення пухлини в результаті хірургічного втручання. Завдяки самоустановці стента по діаметру протоки спрощуються хірургічні маніпуляції. Аналогів у сучасній медичній техніці такі стенти не мають.

Розроблено сплав з ефектом пам'яті форми, який має феромагнітні властивості, що важливо в тих випадках, коли потрібна термічна обробка ураженої ділянки тіла. Введення інструменту з такого сплаву в потрібне місце і подальше індукційне нагрівання дозволяють підвищити температуру в заданих межах. Новизна рішень у всіх перерахованих роботах підтверджена патентами України.

**Біокерамічні мікроплазмові покриття для ендопротезів.** Розвиток практики оперативного лікування захворювання суглобів і травм опорно-рухового апарату з встановленням ендопротезів вимагає застосування металевих імплантантів з біокерамічними покриттями. При цьому механічна міцність металевої основи поєднується з біологічними особливостями біокерамічного матеріалу, що дає потрійний позитивний ефект:

підвищення швидкості формування кісткової тканини, можливість утворення зв'язку з кісткою (остеоінтеграції) і зниження корозії металу.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено оригінальне обладнання і технологію мікроплазмового напилення біокерамічних покриттів (гідроксиапатит, трикальційфосфат). Встановлено основні фактори мікроплазмового напилення, які впливають на фазовий склад і структуру біокерамічних покриттів, та визначено ступінь впливу кожного з них. Нова технологія дає можливість керування співвідношенням кристалічної і аморфної фаз в покритті (від 70/30 до 98/2), зниження ступеня розкладання гідроксиапатиту і небезпеки появи токсичних фаз (СаО), формування в покритті текстури біокераміки, яка за своїм направленням відповідає природній кістковій тканині. Це підвищує ступінь біосумісності покриттів, сприяє оптимальному проходженню процесу фіксації ендопротеза в організмі і його довгорічній надійності.

Мікроплазмове напилення двошарових покриттів, коли на титанову основу імплантату спочатку наноситься шар титанового покриття з біомодальною пористістю, а потім шар біокераміки (наприклад, гідроксиапатит), дозволяє, з одного боку, підвищити міцність зчеплення біокерамічного покриття з імплантатом, з іншого – забезпечує більш надійний зв'язок імплантату з кісткою. Випробування такої структури мікроплазмового покриття на міцність з'єднання з кісткою показало її перевагу в порівнянні із широко відомим у світовій практиці напіканням на поверхню імплантату сферичних частинок. Розробку мікроплазмових покриттів для ендопротезування ІЕЗ ім. Є.О. Патона проводить у співпраці з Інститутом ортопедії і травматології АМН України, Інститутом онкології АМН України та Харківським інститутом ортопедії і травматології. Результати цих робіт успішно використані в практиці нанесення покриттів з гідроксиапатиту на імплантати для безцементного ендопротезування кульшового суглоба і для оперативного лікування хворих з нестабільними формами дегенеративно-дистрофічних захворювань хребта.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона спільно з Інститутом ортопедії і травматології АМН України та ТОВ "Мотор Січ" розроблено ендопротез кульшового суглоба нової конструкції з новим типом мікроплазмового покриття.

**Композиційні матеріали, отримані на основі нанотехнологій.** Процеси електронно-променевого випаровування і наступної конденсації різних речовин у вакуумі дозволяють створювати нові матеріали, які неможливо отримати металургійним шляхом. Перебуваючи в паровій фазі речовини знаходяться в атомарному або молекулярному стані. Змішуючи парові потоки речовин, а потім конденсуючи їх на підкладці, можна отримувати такі поєднання і співвідношення компонентів, їх структури та властивості матеріалів, які дуже важко або неможливо здійснити іншими методами.

#### 4. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ І СПОРІДНЕНІ ПРОЦЕСИ...

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона накопичено значний технологічний досвід "конструювання" нових неорганічних матеріалів та покриттів, отримання багатьох одно- і багатофазних металічних і керамічних конденсатів у широкому діапазоні форм та розмірів елементів структури. Розміри зерен, частинок, фаз, пор, товщини мікрошарів можна варіювати в межах від декількох нанометрів до 5...10 мкм. Технологія подібного рівня прецизійності належить до розряду сучасних нанотехнологій.

Установлено характерні залежності "структура–властивості" для нових матеріалів. Товсті конденсати можна отримати у вигляді покриттів на виробих або відокремленими від підкладок у вигляді фольги, листа, деяких виробів тощо.

За практичним застосуванням лідирують термобар'єрні градієнтні покриття системи метал–кераміка. Високий рівень механічних властивостей досягнуто в композиційних матеріалах з металічною матрицею (алюміній, мідь, залізо, нікель і їх сплави) з наночастинками тугоплавких оксидів, рівномірно розташованих у матриці. Ці матеріали отримують одночасним незалежним випаровуванням з двох джерел металу (сплаву) та оксиду з конденсацією змішаного потоку.

Проведені в ІЕЗ ім. Є.О. Патона експерименти показали, що цей технологічний підхід може бути застосований для отримання так званих колоїдних систем медичного призначення, наприклад магнітних рідин. Ці системи отримують, використовуючи неорганічну (або органічну) матрицю, в яку спочатку шляхом випаровування і конденсації вводять наночастинки іншої речовини, яка не взаємодіє з матрицею, а потім матрицю видаляють, наприклад розчиняючи її в рідині.

На рис. 4.14,а,б показано магнітні наночастинки  $Fe_3O_4$ , отримані з водного розчину простим технологічним циклом: спільне випаровування з двох незалежних джерел  $NaCl$  і  $Fe_3O_4$ ; подальша конденсація змішаного парового потоку на сталевий підкладці; відділення конденсату від підкладки розчиненням у воді. Змінюючи температуру підкладки в межах 250 °С, можна плавно регулювати середній розмір частинок  $Fe_3O_4$  від 2 до 15 нм.

Стабілізація частинок здійснюється стандартними методами, добавками біосумісних полімерів (декстрином і полівініловим спиртом). Частинки  $Fe_3O_4$  легко замінити магнітними наночастинками нікелю, кобальту або їх сплавами, випаровуючи на нікель або кобальт замість  $Fe_3O_4$ . Можна також "сконструювати" двошарову (композитну) наночастинку, ввівши в паровий потік відповідну добавку, наприклад міді з незалежного третього джерела.

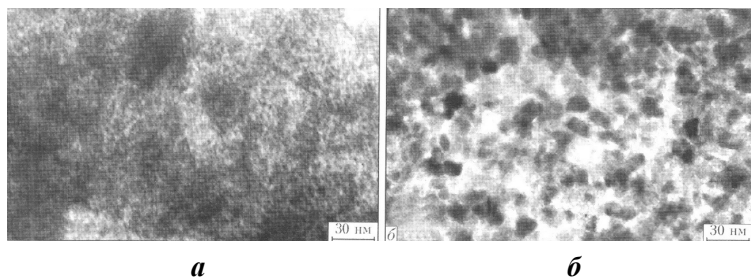


Рис. 4.14. Середній розмір наночастинок  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ :  
*а* – 5 нм; *б* – 15 нм

Використання магнітних наночастинок для цілеспрямованого транспорту лікарських препаратів у необхідну ділянку живого організму перш за все в терапії раку дозволить посилити дію лікарських препаратів та розширити можливості контрастної магніторезонансної томографії.

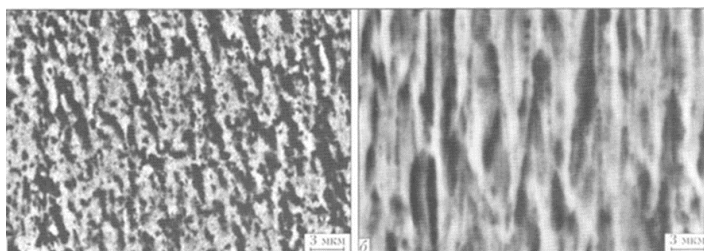
Нерівноважні процеси випаровування і конденсації дозволяють отримувати великий клас пористих конденсатів, які викликають інтерес для медицини. Існує ряд механізмів і умов формування таких конденсатів. Один з основних механізмів утворення пористості базується на так званому ефекті затінення. У процесі зародження та подальшого зростання з неоднаковою швидкістю різних кристалографічних граней на поверхні конденсації формується певний рельєф. Грані і виступи, що ростуть з максимальною швидкістю, екранують сусідні ділянки поверхні від парового потоку, внаслідок чого утворюються внутрішні пустоти. Якщо на поверхні конденсату утворюється рельєф, обумовлений зародженням і зростанням частинок наночастинок, то пориста структура формується за рахунок ерозії при опроміненні прискореними іонами газів або хімічних реакцій (травлення) з видаленням продуктів реакцій.

На рис. 4.15,*а* показано мікроструктуру поперечного перерізу конденсату  $\text{Ni}-16\% \text{ZrO}_2 - 7\% \text{Y}_2\text{O}_3$  (% мас.) товщиною 420 мкм, отриманого осадженням змішаного парового потоку  $\text{Ni}$  і  $\text{ZrO}_2$  (7%  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ). Наночастинок оксиду цирконію, що утворюються на поверхні конденсації в процесі осадження, стимулюють формування пористості з характерною спрямованою (стовпчастою) орієнтацією. На рис. 4.15,*б* показано мікроструктуру пористого конденсату титану товщиною 420 мкм, отриманого осадженням змішаного парового потоку титану і  $\text{NaCl}$ , випаровування яких здійснювалося з двох незалежних джерел.

Практично всі речовини, що випаровуються електронним променем, можна отримувати у вигляді пористих конденсатів з регульованими в широких межах розмірами, формами і кількістю пор. Це сорбенти,

#### 4. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ І СПОРІДНЕНІ ПРОЦЕСИ...

фільтри, каталізатори і носії каталізаторів, а також функціональні покриття на поверхні біоімплантатів. Подальше регулювання властивостей пористих покриттів можна здійснювати за допомогою капілярного просочування рідкої фази в покриття при осадженні або після осадження, наприклад просочуванням фармакологічного препарату в пористе покриття на стентах для стримання запальних процесів і рестіноза на початкових стадіях після введення стента в організм.



*a*

*б*

Рис. 4.15. Мікроструктура пористих конденсатів  $\text{Ni} - 16\% \text{ZrO}_2 (7\% \text{Y}_2\text{O}_3)$  (*a*) і чистого титану (*б*)

У Міжнародному центрі електронно-променевої технології ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено і налагоджено виробництво лабораторного, дослідно-промислового і промислового електронно-променевого обладнання для реалізації різних варіантів технологічних процесів випаровування і конденсації у вакуумі. Вироблено десятки установок для університетів, наукових центрів і промислових підприємств США, Китаю, Канади та Індії. Це обладнання легко адаптувати як для досліджень, так і промислового виробництва медичних препаратів.

#### ***4.3.4. Застосування паро-плазмової технології для переробки медичних відходів***

Одним з перспективних напрямків застосування технологій, які базуються на зварювальних і споріднених процесах, в медицині є переробка і утилізація специфічних відходів, які накопичуються в установах охорони здоров'я. Це шприци, системи переливання крові, перев'язувальні матеріали, медичні рукавички, паперові, пластикові упаковки, серветки, біологічні та інші відходи.

Згідно з міжнародними документами в переліку налічується 45 видів найбільш небезпечних відходів і на першому місці стоять відходи установ охорони здоров'я. За літературними даними, в США утворюється близько 3 млн т медичних відходів на рік, в Росії і Китаї до 1 млн т, в Україні розрахункова кількість становить близько 350 тис. т на рік. Тому

проблема їх переробки є надзвичайно актуальною і важливою. Одним із перспективних способів переробки відходів є використання енергії плазмової дуги замість спалювання та захоронення. Для вирішення зазначеної проблеми в ІЕЗ ім. Є.О. Патона спільно з Інститутом газу НАН України для переробки медичних та інших подібних відходів розроблено технологічний процес і відповідне дослідно-промислове обладнання, що базуються на використанні так званої парової плазми, де як плазмотворюючий газ використовується водяна пара. Оцінка ефективності процесу переробки відходів показала, що реалізація запропонованої технології дозволяє здійснити високоефективну (близьку до 100 %) переробку даного виду органічних відходів з одночасним отриманням побічного цільового продукту у вигляді синтез-газу, який є цінним енергоносієм, а також безпечних твердих продуктів переробки, придатних для використання, наприклад у будівництві.

Аналіз показує, що в результаті паро-плазмового піролізу з кожного кілограма пластикових відходів можна отримати близько кубометра синтетичного газу, що з лишком компенсує енерговитрати на здійснення паро-плазмового процесу.

У процесі переробки зв'язуються і легко видаляються такі небезпечні елементи, як хлор, фтор та інші, які входять до складу багатьох пластичних матеріалів. У продуктах переробки, на відміну від відомих технологій, практично повністю відсутні смоли, феноли тощо. При газифікації речовин, що містять вуглець при високих термодинамічних параметрах у газовій фазі, відсутні сполуки сірки: вона повністю залишається в твердому залишку (шлаку). Процес плазмової газифікації не чутливий до вологості і складу оброблюваних відходів.

Проведені дослідження і випробування підтвердили перспективність даного методу. Відповідне обладнання може бути виготовлене як в стаціонарному, так і в мобільному виконанні. Це обумовлює реальну технічну базу для утилізації відходів у місці їх утворення та накопичення. Крім медичних, можуть бути утилізовані також інші органічні відходи, в тому числі і такі небезпечні, як пестициди та отрутохімікати, пластиковий посуд і ємності, автомобільні шини, деревна стружка та ін. Зазначені переваги розробленого нового обладнання і технологічного процесу служать надійним підґрунтям для його просування на ринок. Потреби українського, європейського та світового ринків (з урахуванням даних за кількістю накопичених відходів закладами охорони здоров'я) практично не обмежені.

Одним з пріоритетних напрямків розвитку зварювання та споріднених процесів і технологій є використання їх можливостей з метою поліпшення здоров'я людини та навколишнього середовища. Є всі підстави



#### 4. СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЗВАРЮВАННЯ І СПОРІДНЕНІ ПРОЦЕСИ...

---

вважати, що спільні зусилля вчених і фахівців у галузі зварювання і медицини принесуть великі успіхи в хірургії, діагностиці, нових конструктивних рішеннях при створенні медичного обладнання та інструментарію, розробці новітніх матеріалів для протезування, а також створенні ефективних засобів охорони навколишнього середовища.

##### Контрольні питання і завдання

1. Способи підводного зварювання залежно від середовища, в якому вони виконуються.
2. Сухе підводне зварювання та його застосування.
3. Підводне зварювання з локальним осушенням та його застосування.
4. Особливості мокрого підводного дугового зварювання порівняно зі зварюванням на повітрі.
5. Особливості металургійних процесів при дуговому мокрому зварюванні під водою.
6. Особливості структури з'єднань при підводному мокрому зварюванні.
7. Підводне мокре зварювання електродами і зварювальні матеріали.
8. Механізоване підводне дугове зварювання порошковими дротами.
9. Електродугове різання металів під водою.
10. Бензиново-кисневе, ацетилено-кисневе, термічне та різання вибухом металів під водою.
11. Особливості космічного середовища, які впливають на зварювання і споріднені процеси.
12. Аналіз способів зварювання щодо можливості їх використання в космосі.
13. Обґрунтуйте вибір електронно-променевої технології зварювання, паяння, різання та напилення в космосі.
14. Основні напрямки використання зварювання і споріднених технологій у медицині.
15. Високочастотне зварювання живих тканин та його переваги.
16. Основні фази реструктуризації живих тканин і структури при їх високочастотному зварюванні.
17. Гіпертермічні способи зварювання, різання та обробки живих тканин у медицині.
18. Використання матеріалів з ефектом пам'яті форми для виготовлення імплантів, протезів і спеціальних хірургічних інструментів.
19. Біокерамічні мікроплазмові покриття для ендопротезів.
20. Застосування паро-плазмової технології для переробки медичних відходів.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

1. **Авилов, Т. И.** Свойства дуги при подводной сварке [Текст] / Т. И. Авиллов // Сварочное производство. – 1960. – № 2. – С. 19–21.
2. Автомат для дуговой подводной сварки мокрым способом в стесненных условиях [Текст] / В. А. Лебедев, С. Ю. Максимов, В. Г. Пичак, Д. И. Зайнулин // Автоматическая сварка. – 2014. – № 9. – С. 41–46.
3. **Башенко, В. В.** Применение мощного лазерного луча в сварочной технике [Текст] / В. В. Башенко, В. А. Лопота, Л. А. Штернин. – Л. : ЛДНТП, 1986. – 32 с.
4. Взаимодействие пучка излучения CO<sub>2</sub>-лазера с плазмой электрической дуги при гибридной (лазер+ТИГ) сварке [Текст] / И. В. Кривцун, И. В. Крикент, В. Ф. Демченко [и др.] // Автоматическая сварка. – 2015. – № 3–4. – С. 7–16.
5. **Гарофало, Ф.** Законы ползучести и длительной прочности металлов [Текст] / Ф. Гарофало; пер. с англ. Ю. Г. Андреева. – М. : Металлургия, 1968. – 304 с.
6. **Гельман, А. С.** Основы сварки давлением [Текст] / А. С. Гельман. – М. : Машиностроение, 1970. – 312 с.
7. Гибридная лазерно-микроплазменная сварка металлов малых толщин [Текст] / Б. Е. Патон, В. С. Гвоздецкий, И. В. Кривцун [и др.] // Автоматическая сварка. – 2002. – № 3. – С. 3–9.
8. Гибридная лазерно-плазменная сварка алюминиевых сплавов [Текст] / И. В. Кривцун, В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин [и др.] // Автоматическая сварка. – 2007. – № 5. – С. 49–53.
9. **Голобородько, Ж. Г.** Влияние плазмообразующей среды при резке на образование пор при сварке судокорпусных сталей [Текст] / Ж. Г. Голобородько, В. В. Квасницкий // Зб. наук. праць УДМТУ. – Миколаїв : УДМТУ, 2002. – № 3. – С. 25–31.

10. **Головенко, С. А.** Сварка прокаткой биметаллов [Текст] / С. А. Головенко. – М. : Металлургия, 1976. – 160 с.
11. Горячая обработка металлов в вакууме и инертной среде [Текст] / Ф. Е. Долженков, Ю. И. Кривоносов, Д. И. Пирязев [и др.]. – К. : Техніка, 1969. – 200 с.
12. **Грецкий, Ю. Я.** Повышение устойчивости дуги, горящей в воде, при сварке порошковой проволокой [Текст] / Ю. Я. Грецкий, С. Ю. Максимов // Автоматическая сварка. – 2004. – № 2. – С. 11–15.
13. **Григорьянц, А. Г.** Лазерная резка металлов [Текст] : учеб. пособие для вузов / А. Г. Григорьянц, А. А. Соколов. – М. : Высшая школа, 1988. – 127 с.
14. **Григорьянц, А. Г.** Лазерная сварка металлов [Текст] : учеб. пособие для вузов / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов. – М. : Высшая школа, 1988. – 207 с.
15. Диффузионная сварка материалов [Текст] : справочник / под общ. ред. Н. Ф. Казакова. – М. : Машиностроение, 1981. – 271 с.
16. **Дудин, А. А.** Магнитоимпульсная сварка металлов [Текст] / А. А. Дудин. – М. : Металлургия, 1979. – 128 с.
17. **Зуев, И. В.** Методика расчета режимов ЭЛС с учетом экспериментальных значений термического КПД [Текст] / И. В. Зуев, Ф. В. Родякина, Д. Е. Волков // Сварочное производство. – 1996. – № 3. – С. 27–29.
18. **Казаков, Н. Ф.** Диффузионная сварка материалов [Текст] / Н. Ф. Казаков. – М. : Машиностроение, 1976. – 312 с.
19. **Каракозов, Э. С.** Сварка металлов давлением / Э. С. Каракозов. – М. : Машиностроение, 1988. – 280 с.
20. **Квасницкий, В. В.** Влияние режима охлаждения после диффузионной сварки и пайки на остаточные напряжения в торцовых соединениях графита и меди [Текст] / В. В. Квасницкий, Г. В. Ермолаев, М. В. Матвиенко // Автоматическая сварка. – 2015. – № 11. – С. 25–31.
21. **Квасницкий, В. В.** Спеціальні способи зварювання [Текст] : навч. посіб. / В. В. Квасницкий. – Миколаїв : УДМТУ, 2003. – 437 с.
22. **Квасницкий, В. Ф.** Сварка и пайка жаропрочных сплавов в судостроении [Текст] / В. Ф. Квасницкий. – Л. : Судостроение, 1984. – 224 с.
23. **Квасницкий, В. Ф.** Специальные способы сварки и пайки в судостроении [Текст] : учеб. пособие / В. Ф. Квасницкий. – Л. : Судостроение, 1984. – 224 с.
24. **Квасницкий, В. Ф.** Технология диффузионной сварки в вакууме жаропрочных сплавов [Текст] / В. Ф. Квасницкий, Б. А. Кох, А. И. Сафонов. – Л. : ЛДНП, 1969. – 24 с.

25. **Киреев, Л. С.** Физико-химия процесса получения пористо-компактных материалов на основе титана [Текст] / Л. С. Киреев, В. В. Пешков, В. Ф. Селиванов ; под ред. акад. Б. Е. Патона. – К. : ИЭС, 2003. – 318 с.
26. **Коваленко, В. С.** Комбіновані лазерно-дугові процеси обробки матеріалів [Текст] : у 2 ч. Ч. I. Ефекти комбінованої обробки і способи її реалізації / В. С. Коваленко, І. В. Кривцун // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2001. – № 5. – С. 33–44.
27. **Коваленко, В. С.** Комбіновані лазерно-дугові процеси обробки матеріалів [Текст] : у 2 ч. Ч. II. Теологічні можливості комбінованого джерела тепла і взаємовплив його складових / В. С. Коваленко, І. В. Кривцун // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2001. – № 6. – С. 47–66.
28. **Конан, Ю. А.** Сварка взрывом [Текст] / Ю. А. Конан, Л. Б. Первухин, А. Д. Чудновский ; под ред. В. М. Кудинова. – М. : Машиностроение, 1987. – 216 с.
29. **Конюшков, Г. В.** Специальные методы сварки [Текст] : учеб. пособие / Г. В. Конюшков, Р. А. Мусин. – Саратов : Ай Пи Эр Медиа, 2009. – 612 с.
30. **Копельман, Л. А.** Основы теории прочности сварных конструкций [Текст] : учеб. пособие / Л. А. Копельман. – 2-е изд. исправл. – С.Пб : Лань, 2010. – 464 с.
31. Космос: технологии, материаловедение, конструкции [Текст] : сб. науч. трудов / под ред. акад. Б. Е. Патона. – К. : ИЭС им. Е.О. Патона, 2000. – 528 с.
32. **Котельников, Д. И.** Сварка давлением в тлеющем разряде [Текст] / Д. И. Котельников. – М. : Metallurgia, 1981. – 116 с.
33. **Красулин, Ю. Л.** Микросварка давлением [Текст] / Ю. Л. Красулин, Г. В. Назаров. – М. : Metallurgia, 1976. – 160 с.
34. **Кривцун, И. В.** Гибридные лазерно-плазменные процессы сварки и обработки материалов [Текст] / И. В. Кривцун // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2009. – № 3. – С. 13–27.
35. **Кривцун, И. В.** Основы расчета лазерно-дуговых плазмотронов [Текст] / И. В. Кривцун, М. И. Чиженко // Автоматическая сварка. – 1997. – № 1. – С. 16–23.
36. **Кривцун, И. В.** Особенности работы трубчатого термокатода, подогреваемого лазерным излучением [Текст] / И. В. Кривцун // Автоматическая сварка. – 2001. – № 10. – С. 56–62.
37. **Кучук-Яценко, С. И.** Влияние технологических параметров и динамики торможения при сварке трением на структуру и свойства соединений меди с алюминием [Текст] / С. И. Кучук-Яценко, И. В. Зяхор, Г. Н. Гордань // Автоматическая сварка. – 2002. – № 6. – С. 3–8.

38. **Кучук-Яценко, С. И.** Прессовая сварка толстостенных труб с нагревом дугой, управляемой магнитным полем [Текст] / С. И. Кучук-Яценко, В. С. Качинский, В. Ю. Игнатенко // Автоматическая сварка. – 2002. – № 7. – С. 28–33.
39. Лазерная сварка жаропрочных сплавов [Текст] / В. Ф. Квасницкий, Н. В. Алтухов, А. Г. Григорьянц [и др.] // Труды НКИ. – Николаев : НКИ, 1982. – Вып. 184. – С. 49–56.
40. Лазерно-дуговая сварка высокопрочных сталей с пределом текучести более 700 МПа [Текст] / В. Д. Позняков, В. Д. Шелягин, С. Л. Жданов [и др.] // Автоматическая сварка. – 2015. – № 10. – С. 20–25.
41. Лазерно-дуговые и лазерно-плазменные технологии сварки и нанесения покрытий [Текст] / В. Д. Шелягин, И. В. Кривцун, Ю. С. Борисов [и др.] // Автоматическая сварка. – 2005. – № 8. – С. 49–54.
42. **Люшинский, А. В.** Диффузионная сварка разнородных материалов [Текст] : учеб. пособие для вузов / А. В. Люшинский. – М. : Академия, 2006. – 208 с.
43. **Мадатов, Н. М.** Подводная сварка и резка металлов [Текст] : Н. М. Мадатов. – Л. : Судостроение, 1967. – 164 с.
44. **Максимов, С. Ю.** Структурные изменения в металле ЗТВ соединений стали Х60 при подводной сварке [Текст] / С. Ю. Максимов, В. С. Бут, В. Г. Васильев [и др.] // Автоматическая сварка. – 2006. – № 2. – С. 18–21.
45. **Маркашова, Л. И.** Особенности пластической деформации разнородных материалов при сварке давлением [Текст] / Л. И. Маркашова, В. В. Арсенюк, Г. М. Григоренко // Автоматическая сварка. – 2002. – № 5. – С. 12–16.
46. **Махненко, В. И.** Исследование особенностей переноса водорода при подводной сварке плавлением конструкционных сталей [Текст] / В. И. Махненко, С. Ю. Максимов, Т. В. Королева // Автоматическая сварка. – 2004. – № 1. – С. 12–22.
47. **Махненко, В. И.** Напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке материалов с разными физико-механическими свойствами [Текст] / В. И. Махненко, В. В. Квасницкий, Г. В. Ермолаев // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах : сб. трудов четвертой междунар. конф. 27–30 мая 2008 г. ; под ред. проф. В. И. Махненко. – К. : ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 2009. – С. 95–102.
48. **Махненко, В. И.** Напряженно-деформированное состояние соединений при диффузионной сварке материалов с разными физико-механическими свойствами [Текст] / В. И. Махненко, В. В. Квасницкий, Г. В. Ермолаев // Автоматическая сварка. – 2008. – № 8. – С. 5–10.

49. **Махненко, В. И.** Напряженно-деформированное состояние узлов цилиндрической формы при диффузионной сварке [Текст] / В. И. Махненко, В. В. Квасницкий // Автоматическая сварка. – 2009. – № 2. – С. 5–10.
50. **Махненко, В. И.** Особенности формирования напряженно-деформированного состояния соединений разнородных материалов, полученных диффузионной сваркой [Текст] / В. И. Махненко, В. В. Квасницкий // Автоматическая сварка. – 2009. – № 8. – С. 11–16.
51. **Махненко, В. И.** Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций [Текст] / В. И. Махненко. – К. : Наукова думка, 1976. – 320 с.
52. Машиностроение. Энциклопедия. Технология сварки, пайки и резки [Текст] : Т. III-4 / В. К. Лебедев, С. И. Кучук-Яценко, А. И. Чвертко [и др.] ; под ред. Б. Е. Патона. – М. : Машиностроение, 2006. – 768 с.
53. **Медовар, Б. И.** Сварка жаропрочных аустенитных сталей и сплавов [Текст] / Б. И. Медовар. – М. : Машиностроение, 1966. – 430 с.
54. **Метелкин, И. И.** Сварка керамики с металлами [Текст] / И. И. Метелкин, М. А. Павлова, Н. В. Позднева. – М. : Металлургия, 1977. – 160 с.
55. Микроплазменная сварка [Текст] / Б. Е. Патон, В. С. Гвоздецкий, Д. А. Дудко [и др.] ; под ред. акад. Б. Е. Патона. – К. : Наукова думка, 1979. – 248 с.
56. **Назаренко, О. К.** Основы электронно-лучевой сварки [Текст] / О. К. Назаренко. – К. : Наукова думка, 1975. – 226 с.
57. Напруження та деформації при зварюванні і паянні [Текст] : підручник / А. М. Лобанов, Г. В. Єрмолаєв, В. В. Квасницький, О. В. Махненко, Г. В. Єгоров, А. В. Лабарткава. – Миколаїв : НУК, 2016. – 248 с.
58. **Николаев, Г. А.** Специальные методы сварки [Текст] : учеб. пособие / Г. А. Николаев, К. А. Ольшанский. – М. : Машиностроение, 1975. – 232 с.
59. Основные тенденции развития плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов [Текст] / А. А. Гринюк, В. Н. Коржик, В. Б. Шевченко [и др.] // Автоматическая сварка. – 2015. – № 11. – С. 39–50.
60. Патент на винахід № 81583. Спосіб дифузійного зварювання матеріалів [Текст] / В. В. Квасницький, М. В. Матвієнко, Г. В. Єрмолаєв [та ін.] ; Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. МПК (2008). В23К20/14; заявл. 21.11.2006 ; опубл. 10.01.2008, Бюл. № 1.
61. **Патон, Б. Е.** Сварка и родственные технологии в космосе [Текст] / Б. Е. Патон, В. Ф. Лапчинский. – К. : Наукова думка, 1998. – 184 с.
62. **Патон, Б. Е.** Сварка и родственные технологии в медицине [Текст] / Б. Е. Патон // Автоматическая сварка. – 2008. – № 11. – С. 13–23.

63. Паяння матеріалів [Текст] : підручник / Г. В. Єрмолаєв, В. В. Квасницький, В. Ф. Квасницький, С. В. Максимова, В. Ф. Хорунов, В. В. Чигарьов ; за заг. ред. В. Ф. Хорунова і В. Ф. Квасницького. – Миколаїв : НУК, 2015. – 340 с.
64. **Пипко, А. И.** Конструирование и расчет вакуумных систем [Текст] : А. И. Пипко, В. Я. Плисковский, Е. А. Пинчко. – М. : Энергия, 1979. – 504 с.
65. Производство сварных конструкций в судовом газотурбостроении [Текст] / Ю. В. Бутенко, В. Ф. Квасницький, В. В. Квасницький, А. Ю. Бутенко ; под общ. ред. В. Ф. Квасницького. – Николаев : НУК, 2014. – 168 с.
66. Промышленное применение гибридной лазерно-дуговой сварки (Обзор) [Текст] / И. В. Кривцун, В. Ю. Хаскин, В. Н. Коржик, Ло Цзын // Автоматическая сварка. – 2015. – № 7. – С. 44–50.
67. Процессы массопереноса в условиях сварки давлением разнородных материалов [Текст] / Л. И. Маркашова, В. В. Арсенюк, Г. М. Григоренко [и др.] // Автоматическая сварка. – 2002. – № 7. – С. 43–49.
68. **Рыкалин, Н. Н.** Расчеты тепловых процессов при сварке [Текст] / Н. Н. Рыкалин. – М. : Машгиз, 1951. – 296 с.
69. **Сафонов, А. И.** Применение диффузионно-вакуумной сварки в турбостроении [Текст] / А. И. Сафонов, В. Ф. Квасницький, В. И. Красильников // Тезисы докладов на Всесоюзном научно-техническом совещании "Обмен опытом по сварке металлов в области судового машиностроения". – Л. : ЛДНТ, 1962. – С. 14–15.
70. Сварка в машиностроении [Текст] : справочник / под ред. Н. А. Ольшанского. – М. : Машиностроение, Т. 1, 1978. – 502 с.
71. Сварка, резка и термическая обработка живых тканей [Текст] / Б. Е. Патон, И. В. Кравцун, Г. С. Маринский [и др.] // Автоматическая сварка. – 2013. – № 10–11. – С. 135–146.
72. Сварка трением [Текст] : справочник / под общ. ред. В. К. Лебедева, И. А. Черненко, В. И. Вилля. – Л. : Машиностроение, 1987. – 236 с.
73. Сварочное оборудование [Текст] : каталог-справочник. – К. : Наукова думка, 1981, Ч. 4. – 326 с.
74. **Сербин, С. И.** Теоретические исследования состава газовой фазы при воздушно-плазменной обработке судокорпусных сталей [Текст] / С. И. Сербин, Ж. Г. Голобородько, В. В. Квасницький // Зб. наук. праць УДМТУ. – Миколаїв : УДМТУ, 2002. – № 6. – С. 34–44.
75. Состояние и тенденции развития сварки дугой, вращающейся в магнитном поле [Текст] / С. И. Кучук-Яценко, П. В. Кузнецов, В. Н. Бернадский [и др.]. – К. : ИЭС, 1981. – 28 с.
76. **Столяров, В. Н.** Жаропрочность сварных соединений, выполненных диффузионной сваркой и прессовой сваркой-пайкой [Текст] / В. Н. Столяров // Автоматическая сварка. – 1971. – № 1. – С. 33–35.

77. **Столяров, В. Н.** Сварка и пайка охлаждаемых рабочих лопаток газовой турбины ЦКТИ ГТУ-1200 [Текст] / В. Н. Столяров, Б. И. Ларухин // Труды ЦКТИ. – 1968. – Вып. 84. С. 33–37.

78. **Стройман, И. М.** Холодная сварка металлов [Текст] / И. М. Стройман. – Л. : Машиностроение, 2004. – 168 с.

79. **Сукач, К. А.** Выбор параметров режима ЭЛС стали 18Х11МНФБ по термическому циклу [Текст] / К. А. Сукач, Г. А. Шилов, В. Г. Васильев // Сварочное производство. – 1986. – № 9. – С. 11–13.

80. Теория, технология и оборудование диффузионной сварки [Текст] : учеб. для вузов / В. А. Бачин, В. Ф. Квасницкий, Д. И. Котельников [и др.]. – М. : Машиностроение, 1991. – 352 с.

81. **Унков, Е. П.** Инженерные методы расчета усилий при обработке металлов давлением [Текст] / Е. П. Унков. – М. : Машгиз, 1955. – 280 с.

82. **Устинов, А. В.** Усовершенствование технологии подводной мокрой сварки покрытыми электродами [Текст] / А. В. Устинов, В. В. Чигарев // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту. – 2000. – Вып. 10. – С. 199–203.

83. **Хаскин, В. Ю.** Современное состояние и перспективы развития технологий лазерной и гибридной наплавки (Обзор) [Текст] / В. Ю. Хаскин, В. Д. Шелягин, А. В. Бернацкий // Автоматическая сварка. – 2015. – № 5–6. – С. 30–37.

84. **Холопов, Ю. В.** Ультразвуковая сварка металлов и пластмасс [Текст] / Ю. В. Холопов. – Л. : Машиностроение, 1988. – 224 с.

85. **Хренов, К. К.** Электрическая сварочная дуга [Текст] / К. К. Хренов. – М. : Машгиз, 1949. – 2104 с.

86. **Шамов, А. Н.** Высокочастотная сварка металлов [Текст] / А. Н. Шамов, И. В. Лунин, В. Н. Иванов. – Л. : Политехника, 1991. – 240 с.

87. Электронно-лучевая сварка [Текст] / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко [и др.] ; под ред. акад. Б. Е. Патона. – К. : Наукова думка, 1987. – 256 с.

88. **Ямпольский, В. М.** Нагрев в вакууме дуговым разрядом [Текст] / В. М. Ямпольский // Электронная промышленность. – 1967. – № 1. – С. 15–17.

89. A High-Current Electron Beam Application for the Surface Modification of Iron, Stainless Steel and Resistant Alloys [Text] / V. V. Kvasnitskii, V. D. Kuznetsov, N. N. Koval [etc.] // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – Allector Press, inc. – 2009. – Vol. 45. № 3. – P. 180–185.

90. **Brown, R. T.** Fundamental Research on Underwater Welding [Text] / R. T. Brown, K. Masubuchi // Welding Journal. – 1975. – № 6. – P. 178–188.

91. **Chon-Liang, Tsai.** Interpretive report on underwater welding [Text] / T. Chon-Liang, K. Masubuchi // Welding Research Council bulletin. – 1977. – № 224. – 37 p.



92. **Edson, D. A.** Magnetically impelled arc butt welding of thinc wall tubers [Text]/D.A. Edson. – S.I. [1982]–7 p. (intern. Inst. Of Welding; Doc. III–726–82).
93. Elemental Composition of the Surface Layers of a Heat-resistant Nickel Alloy Doped with Zirconium Atoms under the Action of Comproession Plasma Flows [Text]/N. N. Cherenda, V. V. Uglov, V. V. Avasnitski and V. F. Kvasnitskii / Journal of Surface Invsti-Technigues. – 2014. – Vol. 8, № 1. – P. 164–168.
94. **Krivtsun, I. V.** Modelling hydrid plasma-laser processes and integrated plasmatrons [Text] / I. V. Krivtsun // Welding Internatonal. – 2004. – Vol. 18, № 4. – P. 268–276.
95. **Sanchez-Ozio, A.** The influence of consumables composition and solidification on inclusion formation and growth in low carbon steel underwater wet welds [Text] / A. Sanchez-Ozio, S. Liu // Welding Research Council Bulletin. – 1995. – № 399. – 59 p.
96. **Seyffarth, P.** Laser-arc processes and their application in welding and material treatment [Text] / P. Seyffarth, I. V. Krivtsun // Welding and Allied Processes. – London : Taylor and Francis, 2002. – Vol. 1. – 184 p.
97. **Seyffarth, P.** Use of Laser Welding Laser Weldability of Steels in Shipbuilding [Text] / P. Seyffarth // Shipbuilding: Education, Science, Production. International Conference 24–25th of September 2002. – Materials of Conference, Vol. 1. – Mykolaiv : USMTU, 2002. – P. 20–25.
98. **Suga, Y.** On improving the mechanical properties of underwater welded joints by postweld heat treatment [Text] / Y. Suga, A. Hasui // IIW IX-1523-88. – 11 p.
99. **Szelagowski, P.** Properties of wet welded joints [Text] / P. Szelagowski, H. Stuhff, P. Loebel // Annual OTC. Houston, Texas, May 1–4, 1989. – P. 77–87.
100. **Yuschenko, K. A.** Study of physico-metallurgical peculiarities of wet arc welding of structural steels [Text] / K. A. Yuschenko, Yu. Ya. Gretskaa, S. Yu. Maksimov // "Underwater wet welding and cutting" ^:international seminar and workshop. TWI North, Middlesbrough, UK, 17–18 April 1997. Woodhead publishing Ltd. – 1998. – P. 6–29.
- 
-