

Міністерство освіти і науки України
Дніпровський державний технічний університет

Перемітько В.В.

Конспект лекцій

з дисципліни

«Інноваційні процеси у зварюванні та споріднених технологіях»

для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня
зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»
освітньої програми
«Технології та устаткування зварювання»
усіх форм навчання

Затверджено
Редакційно-видавничою секцією
науково-методичної ради ДДТУ
19 квітня 2018 р. протокол № 4

Кам'янське

2018

Розповсюдження і тиражування без офіційного дозволу Дніпровського державного технічного університету заборонено.

Конспект лекцій з дисципліни «Інноваційні процеси у зварюванні та споріднених технологіях» для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня спеціальності 131 Прикладна механіка освітньої програми «Технології та устаткування зварювання» усіх форм навчання/ Укл. В.В.Перемітько. – Кам'янське: ДДТУ, 2018. – 133 с.

Укладач:

Перемітько В.В., д.т.н., професор

Відповідальний за випуск:

Носов Д.Г., к.т.н., доц., завідувач кафедри ТУЗ

Рецензент:

Самохвал В.М., к.т.н., доцент кафедри ОМТ

Затверджено на засіданні кафедри **Технології та устаткування зварювання**, протокол № **27** від **02 квітня 2018 р.**

Коротка анотація видання. До конспекту увійшли всі розділи дисципліни, передбачені чинними навчальною та робочою програмами. Крім теоретичних відомостей, наведені питання для самоконтролю засвоєння навчального матеріалу, а також перелік рекомендованої літератури

ЗМІСТ

Стор.

1 Основні напрямки вдосконалення та розвитку зварювального виробництва.....	4
1.1 Роль зварювальних технологій в розвитку національної економіки	4
Металомісткі галузі (5). Підвищення ефективності зварювального виробництва (6). Технології зварювання (6)	
1.2 Основні конструкційні матеріали та особливості їх зварювання.....	10
Сталі для зварних будівельних конструкцій (10). Сталі для зварних машинобудівних конструкцій (23). Алюміній та алюмінієві сплави (29). Титан та титанові сплави (31). Пластмаси (31)	
1.3 Забезпечення точності виготовлення зварних конструкцій.....	36
1.4 Механізація та автоматизація зварювального виробництва.....	39
<i>Контрольні питання до теми 1</i>	42
2 Електродугові технології	43
2.1 Дугове зварювання плавким електродом.....	43
Електродний дріт (44). Захист зони зварювання (56). Зварювальне устаткування (60). Технології (61). Зварювання під флюсом (63)	
2.2 Дугове зварювання неплавким електродом.....	64
2.3 Електродугове наплавлення.....	65
Наплавлений метал (71). Наплавні матеріали (75)	
<i>Контрольні питання до теми 2</i>	84
3 Високотехнологічні процеси	85
3.1 Плазмові технології.....	85
Плазмотрони (85). Плазмове зварювання (85). Плазмове наплавлення (90). Плазмове напилення (98)	
3.2 Лазерні технології.....	98
3.3 Фрикційні технології.....	104
3.4 Реалізація інноваційних підходів (на прикладі газотранспортної системи України).....	112
<i>Контрольні питання до теми 3</i>	131
Список рекомендованої літератури	132

1 Основні напрямки вдосконалення та розвитку зварювального виробництва

Зварювання та споріднені технології відіграють важливу роль в економіці різних країн. Розвиток цих напрямків диктується, з одного боку, наявністю в конкретній країні відповідного наукового та інженерного потенціалу, а з іншого – потребами галузей промисловості.

Ефективність сучасного зварювального виробництва визначається низкою факторів, які носять технологічний та організаційний характер

1. 1 Роль зварювальних технологій в розвитку національної економіки

Понад половини валового національного продукту промислово розвинених країн створюється зв допомогою зварювання та споріднених технологій. При цьому до $\frac{2}{3}$ світового споживання сталевого прокату йде на виробництво зварних конструкцій та споруд, а товщина зварюваних деталей коливається від мікрометрів до метрів, маса зварних конструкцій – від часток граму до сотень та тисяч тон.

Широке застосування зварних конструкцій (ЗК) обумовлене можливістю:

- суміщати переваги складаної конструкції у виробництві з перевагами монолітних в експлуатації;
- розширювати вибір більш раціональних конструктивних рішень при створенні високоякісних та надійних конструкцій;
- застосовувати в конструкціях різномірні матеріали, які найбільш відповідають умовам роботи різних елементів, що дозволяє повноцінно використовувати властивості матеріалів, зменшувати масу та металомісткість конструкцій;
- знижувати виробничі видатки за рахунок покращення технології виготовлення деталей.

У залежності від призначення ЗК та вимог, які до них висуваються, використовують різні конструкційні матеріали. При цьому основним з них є

сталь, виробництво якої складає близько 93% від усього виробництва конструкційних матеріалів.

Металомісткі галузі. Аналітики міжнародного інституту чавуну та сталі (ISI) дійшли висновку про існування прямої залежності між зростанням споживання сталі та загальним економічним рівнем країн з високими темпами зростання внутрішнього валового продукту.

У країнах з розвинутою економікою металоспоживаючими галузями є промислове та цивільне будівництво, суднобудування, важке машинобудування, автомобілебудування, транспортне машинобудування, трубопровідний транспорт. Для більшості цих країн автомобілебудування та суднобудування стали локомотивами сучасної економіки. Для вітчизняного господарства можна назвати декілька економічно обґрунтованих напрямків збільшення металоспоживання. Передовсім, мова йде про виробництво зварних будівельних конструкцій.

На об'єктах базових галузей промисловості України (чорної та кольорової металургії, машинобудування, енергетичної, вуглевидобувної, нафтогазової тощо) експлуатують 36 млн. т несучих металевих конструкцій. Ліва частина даних об'єктів – конструкції будівель та споруд (близько 60%), металеві листові конструкції (переважно сталеві резервуари), електромережеві конструкції (щогли, опори ЛЕП), а також мости. Основу металофонду, який експлуатується, складають металеві конструкції, введені в експлуатацію в 1950-1983 рр., тобто ті, що прослужили 17 – 50 років.

Згідно проведеним дослідженням, фізичний знос металевих конструкцій на момент виходу з ладу складає 35 – 40%. Відносно промислових будівель це означає, що середній вік їх служби становить 40 – 50 років. Сьогодні понад 15% (5,4 млн. т) наявного металофона будівельних конструкцій в Україні потребує термінової заміни.

Провідна роль у транспортній інфраструктурі нашої країни належить залізниці, на яку припадає близько 80% усіх вантажоперевезень. Сьогодні „Укрзалізниця” експлуатує 22 тис. км залізниці, чверть якої знаходиться в

критичному стані. Значно зношений тягловий та рухомий склад: електропоїзди – на 78%, дизель-поїзди – на 83%, пасажирські вагони – на 88%, вантажні – на 80%.

Величезний металофонд накопичено в газотранспортній системі України, загальна довжина якої складає 37,6 тис. км, у тому числі магістральних газопроводів – 22,2 тис. км. За даними „Укравтодора” автодорожня мережа нашої країни складає 170 тис. км, з них 20 тис. км – дороги державного значення. Більшу частину цих доріг побудовано в 1950-60 роках і їх пропускна здатність є надзвичайно низькою.

За орієнтовними оцінками, реалізація лише згаданих вище напрямків збільшення споживання металу в економіці України протягом 10 років дозволить довести питоме споживання сталевого металопрокату до 300...350 кг/ людину.

Підвищення ефективності зварювального виробництва. Існує два взаємопов’язаних шляхів підвищення ефективності зварювального виробництва: зниження ціни та підвищення якості продукції, яка випускається.

При формуванні ціни враховують не лише виробничі видатки факторів, прибуток, але й багато опосередкованих, зокрема рівень цін на ринку тощо. Відомо, що основний вплив на собівартість зварних конструкцій спричиняють: призначення; особливості конструкції; серійність та обсяги виробництва металоконструкцій; вартість енергоносіїв, основних, зварювальних та допоміжних матеріалів; продуктивність праці та якість продукції. На *рис.1* показано схему зниження собівартості зварних конструкцій за основними статтями видатків, а на *рис.2* узагальнено основні фактори, що впливають на якість зварних з’єднань і конструкцій.

Технології зварювання. Покращення технології зварювання відіграє вирішальну роль у забезпеченні якості зварних з’єднань та – в цілому – в створенні високоефективного зварювального виробництва, в якому перші позиції займають дугове та контактне зварювання.

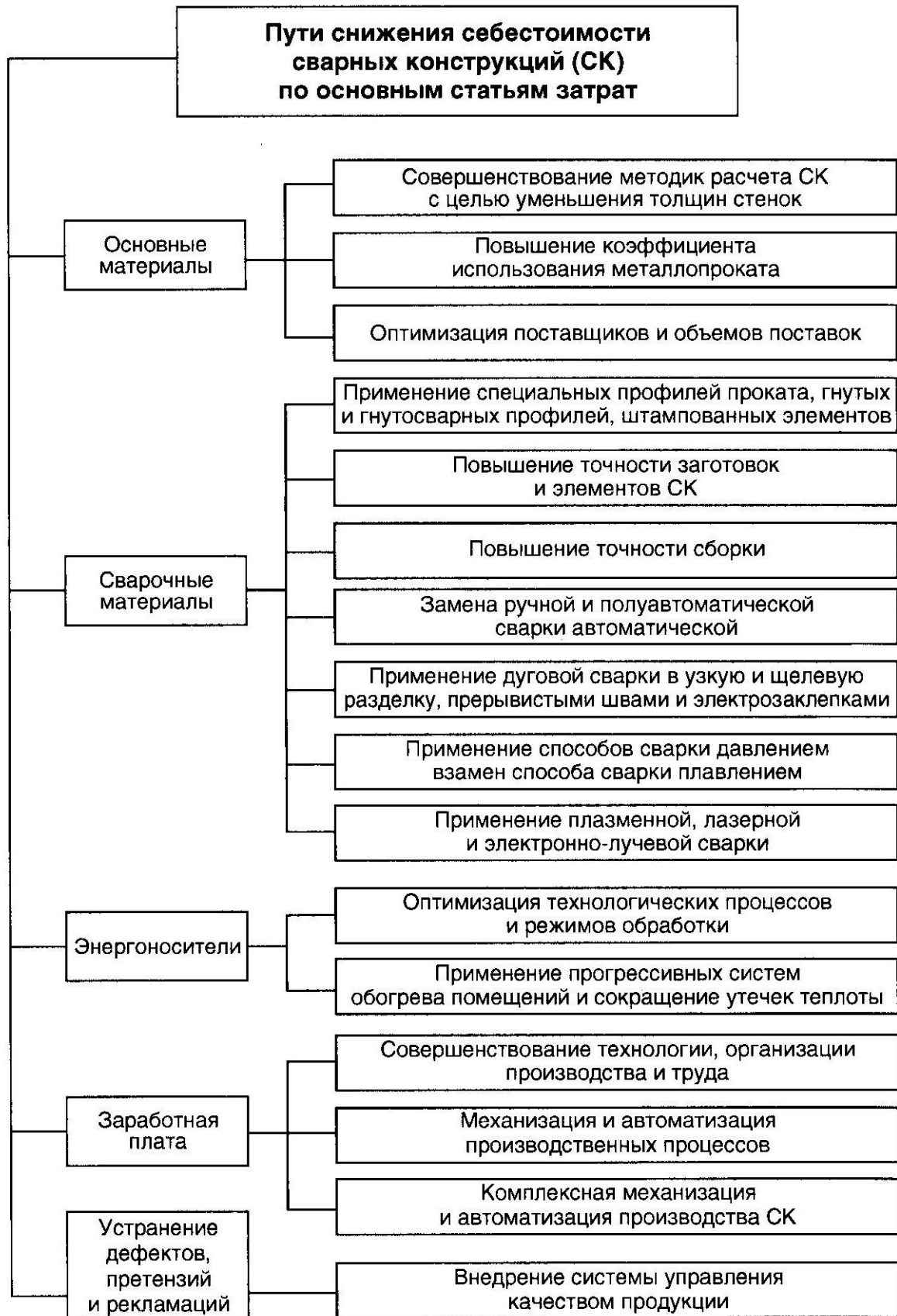


Рисунок 1 – Шляхи зниження собівартості виготовлення сварних конструкцій

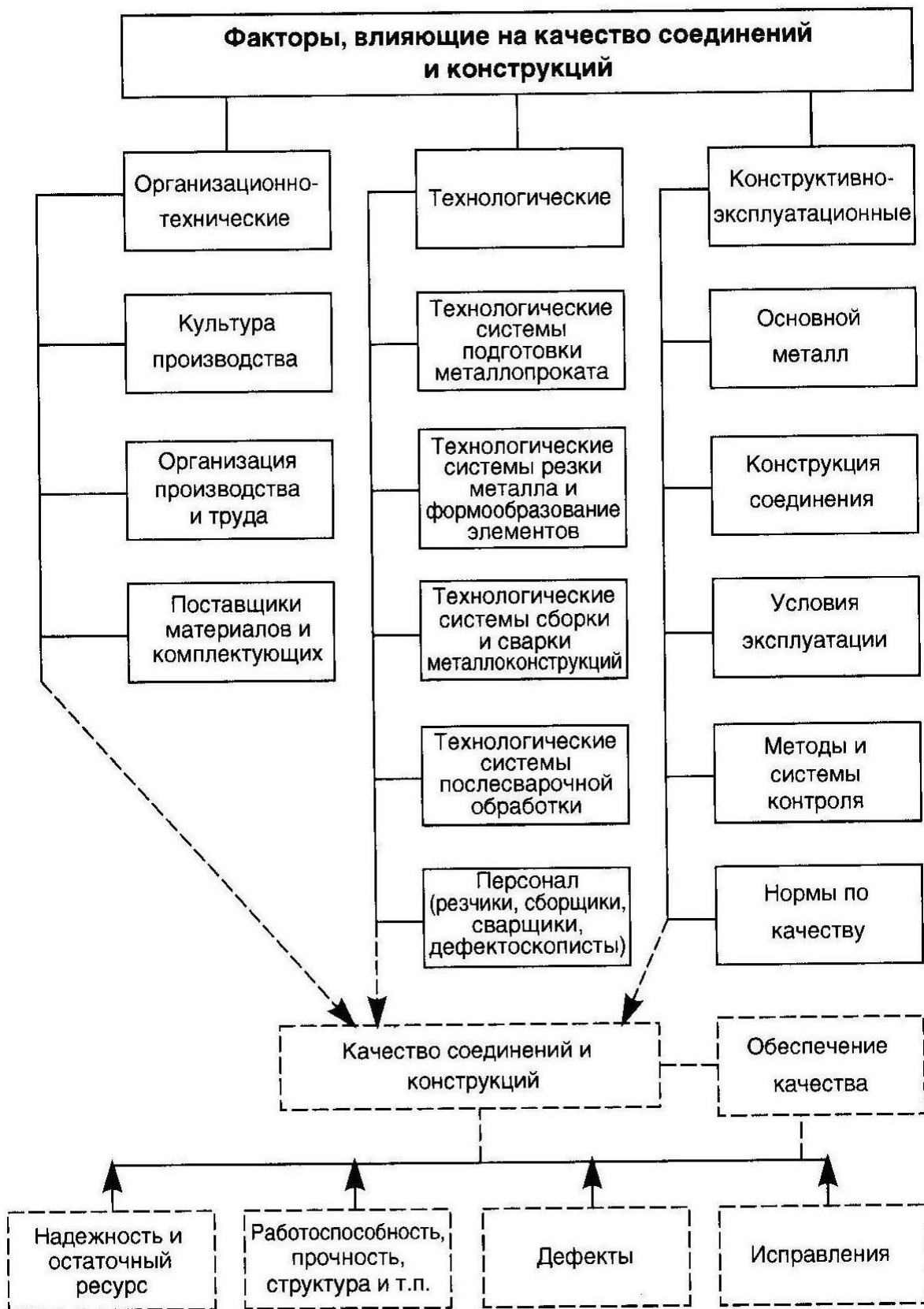


Рисунок 2 – Основні фактори, що впливають на якість з'єднань і конструкцій

У країнах ЄС з 2000 року частка дугового зварювання під флюсом залишається практично незмінною, збільшилися обсяги застосування механізованого зварювання в захисних газах суцільним та порошковим дротом і скоротилася частка ручного дугового зварювання.

Відповідним чином виглядає й структура випуску зварювальних матеріалів у країнах ЄС: покриті електроди для ручного дугового зварювання – 20%; дріт суцільного перерізу для зварювання в захисних газах – 63%; порошковий дріт – 9%; зварювальні флюси – 8%.

Виходячи зі структури споживання зварювальних матеріалів (рис.3), аналогічна картина має місце не лише у західній Європі, але й у США, Японії та Республіці Південна Корея.



Рисунок 3 – Структура споживання зварювальних матеріалів у різних регіонах і країнах світу (2006 рік)

За даними асоціації „Електрод”, у 2007 р. у Росії, Україні та інших СНД у виробництві зварювальних матеріалів частка покритих електродів склала 78,3%; дроти суцільного перерізу для зварювання в захисних газах – 12%; порошкового дроту – 1,1%; флюсів – 8,6%. Це свідчить про те, що питома вага ручного дугового зварювання в цих країнах переважає над рештою способів

зварювання плавким електродом. Велика частка ручного зварювання у вітчизняному зварювальному виробництві не стимулює підвищення точності виготовлення елементів та деталей для зварних конструкцій, збільшує трудомісткість зварювальних робіт та ймовірність появи великої кількості дефектів у швах, а також великих деформацій виробу.

1. 2 Основні конструкційні матеріали та особливості їх зварювання

Матеріал обирають з урахуванням призначення конструкцій, характеру експлуатаційних навантажень (статичних, динамічних, ударних), роботи в умовах низьких та високих температур, агресивних середовищ, зносу тощо. Проте навіть при такому широкому спектрі вимог сталь залишається основним конструкційним матеріалом у будівництві та машинобудуванні.

Разом з тим, усе більшу роль в якості конструкційних матеріалів відіграють алюмінієві та титанові сплави, а також пластмаси. Багато з цих матеріалів використовують у найбільш науково містких галузях економіки.

Сталі для зварних будівельних конструкцій. Як відмічалося раніше, будівництво – одне з найбільш метало містких галузей у світі. Значну частку сталі у будівництві витрачають на виготовлення металоконструкцій, з яких монтують каркаси промислових та цивільних споруд, автодорожні та залізничні мости, опори ліній електропередач, резервуари та газгольдери для зберігання нафти. Нафтопродуктів і газів, морські стаціонарні платформи, трубопроводи та багато іншого.

Виділяють п'ять основних властивостей, які повинна мати сталь для будівельних конструкцій: міцність, зварюваність, опір крихкому руйнуванню, опір в'язкому руйнуванню, техніко-економічна ефективність. Найбільш ефективним для зниження маси (та вартості) є використання комбінованих конструкцій зі сталей різної міцності, які обирають, виходячи з конкретних умов навантаження та конструктивних елементів. Для прокату сталевих конструкцій визначено сім основних рівнів (класів) міцності (*табл.1*).

Таблиця 1 – Класи міцності та категорії якості холодостійкого прокату будівельних сталей

Клас міцності*	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	Температура, °С, при якій гарантується $KCU \geq 0,3$ МДж/м ² , для категорії якості холодостійкості		
				І	ІІ	ІІІ
	не менее					
1 (С38/23)	225	375	25	Не гарантується	-20	Не застосовується
2 (С44/29)	285	430	21	Не застосовується	-40	-70
3 (С46/33)	325	450	21		-40	-70
4 (С52/40)	390	510	19		-40	-70
5 (С60/45)	440	590	16		-40	-70
6 (С70/60)	590	685	12		-40	-70
7 (С85/75)	735	830	10		-40	-70

*У дужках – попереднє позначення

Сталь першого класу ($\sigma_T \geq 225$ МПа) умовно прийнято називати сталлю нормальної міцності, сталь трьох наступних класів ($\sigma_T \geq 285$ МПа, $\sigma_T \geq 325$ МПа, $\sigma_T \geq 390$ МПа) – сталлю підвищеної міцності, а сталь решти класів – сталлю високої міцності. Першому класу міцності відповідає прокат з вуглецевої сталі звичайної якості у гарячекатаному стані, класам міцності від другого до п'ятого – прокат з низько вуглецевої сталі у гарячекатаному або нормалізованому стані, шостому та сьомому класам – прокат з економно легованої сталі, яка поставляється, зазвичай, у термопокрашеному стані. Прокат другого та третього класів отримують також термічним і термомеханічним зміцненням або контрольованою прокаткою.

Прокат з вуглецевої сталі звичайної якості є матеріалом, найбільш вживаним при створенні будівельних конструкцій. За експертними оцінками, частка такого прокату перевищує 70% усіх матеріалів, що використовуються у зварних конструкціях.

Марки та загальні технічні вимоги до вуглецевих будівельних сталей, що застосовуються у країнах СНД, містяться у ГОСТ 380-94 та ГОСТ 27772-88. Сталь виготовляють гарячекатаною – фасонною, товсто- та тонколистовою, ширококутковою, та холоднокатаною – тонколистовою. Зі сталі виготовляють труби, поковки та штамповки, стрічку, дріт та метизи.

У ГОСТ 27772-88 наведені вимоги до прокату вуглецевих сталей для будівельних металокопструкцій, у тому числі норми хімічного складу та механічних властивостей.

У табл. 2 наведено вимоги до прокату вуглецевих сталей за ГОСТ 27772-88.

Таблиця 2 – Механічні властивості листового та широкосмугового універсального прокату за ГОСТ 27772-88 для будівельних сталевих копструкцій

Сталь	Товщина полиці, мм	σ_T , МПа	σ_b , МПа	δ_5 , %	Вигин до паралельності сторін	КСУ, Дж/см ²	
		не менше				при -20°C	після механічного старіння
		не менше					
С235	2-3,9	235	360	20	d=a	-	-
	4-20	235	360	26	d=1,5a	-	-
	20-40	225	360	26	d=2a	-	-
	40-100	215	360	24	d=2a	-	-
	100	195	360	24	d=2a	-	-
С245	2-3,9	245	370	20	d=a	-	-
	4-10	245	370	25	d=1,5a	-	29*
	10-20	245	370	25	d=1,5a	-	29
С255	2-3,9	255	380	20	d=1,5a	-	-
	4-10	245	380	25	d=1,5a	29*	29*
	10-20	245	370	25	d=1,5a	29	29
	20-40	235	370	25	d=2a	29	-
С275	2-3,9	275	380	18	d=1,5a	-	-
	4-10	275	380	24	d=1,5a	-	29*
	10-20	265	370	23	d=1,5a	-	29
285	2-3,9	285	390	17	d=1,5a	-	-
	4-10	275	390	24	d=1,5a	29*	29*
	10-20	265	380	23	d=1,5a	29	29

*Для профілю товщиною 5 мм норма ударної в'язкості 39 Дж/см².

Механічні та технологічні властивості сталей у значній мірі зумовлюються їх розкисненістю.

Спокійну сталь застосовують у відповідальних елементах зварних металоконструкцій, що сприймають динамічні та змінні силові впливи (підкранових балках, елементах мостів і естакад, балках робочих майданчиків металургійних цехів) або тих, що знаходяться у складному напруженому стані (вузлових фасонках кроквяних та підкроквяних ферм).

Найбільш поширеними у будівельних конструкціях напівспокійні сталі. Разом з тим слід відмітити, що механічні властивості вуглецевих спокійної, напівспокійної та киплячої сталей у різних профілях прокату в більшій мірі визначаються товщиною прокату. Практика показує, що зі зменшенням товщини та, як наслідок, зі збільшенням ступеню обтиснення, зниженням температури кінця прокатки та підвищенням швидкості охолодження подрібнюється зерно фериту гарячекатаної сталі всіх трьох ступенів розкислення. Це суттєво підвищує межу текучості та, особливо, питому в'язкість при від'ємних температурах та після механічного старіння. Зі зменшенням товщини листів відмінність властивостей прокату порівнюваних сталей значно зменшується.

Опір втомі зварних з'єднань зі сталей СтЗпс, СтЗсп та СтЗкп практично однаковий. За опором крихкому руйнуванню СтЗпс суттєво перевищує киплячу сталь СтЗкп, наближаючись до спокійної СтЗпс.

Корозійна стійкість у різних агресивних середовищах вуглецевих спокійної, напівспокійної та киплячої сталей практично однакова. Напівспокійна сталь, додатково легована марганцем (СтЗГпс), за основними показниками якості прокату не поступається спокійній сталі.

Прокат вуглецевої напівспокійної сталі рекомендовано для широкої гамми елементів будівельних зварних конструкцій (кроквяних та під кроквяних ферм перекриття, балок та ригелів рамних конструкцій тощо), які експлуатуються у звичайному діапазоні кліматичних температур (не нижче мінус 40°C).

З метою підвищення ефективності металоконструкцій створені *низьколеговані сталі підвищеної міцності*. Для отримання таких сталей використовують легувальні елементи, що в більшій мірі зміцнюють твердий

розчин α -заліза і в меншій – утворюють карбіди або нітриди: кремній, марганець, мідь, нікель, хром, рідше молібден. Прокат з цих сталей поставляють зазвичай після гарячої прокатки (і він має феритно-перлітну мікроструктуру), хоча можлива поставка і після термообробки – нормалізації або термічного покращення.

Межа текучості та тимчасовий опір розриву в прокаті більшості марок низьколегованої сталі не перевищує 350 та 500 МПа відповідно. Цей рівень обумовлений обмеженістю легування, який стримується трьома факторами: погіршенням зварюваності, зниженням опірності крихкому руйнуванню та підвищенням вартості.

При зміцненні будівельної сталі для збереження (або підвищення) стійкості проти крихкого руйнування необхідно одночасне суттєве подрібнення її мікроструктури. Величина зерна фериту в прокаті гарячекатаної низьколегованої сталі залежить від товщини останнього. Вона мінімальна для тонкого прокату, що остигає з найбільшою швидкістю, та зростає зі збільшенням його товщини.

Економічна доцільність застосування низьколегованої сталі залежить від оптової ціни, яка підвищується зі збільшенням вмісту легувальних елементів, особливо таких, як нікель, мідь, молібден. У *табл.3* наведено хімічний склад деяких низьколегованих сталей, що випускаються у країнах СНД за ГОСТ 19281-89. Сталі з додаванням міді є основним конструкційним матеріалом для вітчизняного мостобудування (*табл. 4*).

Основним нормативним документом, що регламентує вимоги до металопрокату для мостових конструкцій, є ГОСТ 6713-89. Він передбачає нормування міцності, пластичності та характеристик в'язкості, проте не гарантує забезпечення опору крихкому руйнуванню (за результатами випробувань на ударну в'язкість зразків з гострим надрізом (KCV)). У той же час, ГОСТ 19281-89 гарантується ударна в'язкість сталей 10ХСНД, 15ХСНД за Шарпі (RCV) не нижче 40 Дж/см² при температурах 0°C та – 20°C.

Таблиця 3 – Хімічний склад низьколегованих сталей підвищеної міцності
% (за масою)

Марка сталі	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
				не більше				
09Г2(Д)	Не більше 0,12	0,17-0,37	1,4-1,8	0,040	0,035	Не більше 0,30		(0,15-0,30)
09Г2С(Д)		0,5-0,7	1,3-1,7	0,040	0,035			(0,15-0,30)
10Г2С1(Д)		0,8-1,1	1,3-1,65	0,040	0,035			(0,15-0,30)
15ХСНД	0,12-0,18	0,40-0,70	0,40-0,70	0,035	0,035	0,60-0,90	0,30-0,60	0,20-0,40
10ХСНД	Не більше 0,12	0,80-1,10	0,50-0,80	0,035	0,035	0,60-0,90	0,50-0,80	0,40-0,60
17ГС	0,14-0,20	0,4-0,6	1,0-1,4	0,040	0,035	Не більше 0,30		
17Г1С	0,15-0,20	0,4-0,6	1,15-1,6	0,040	0,035	Не більше 0,30		

Вище зазначалося, що міцність є визначальною властивістю для будівельної сталі. Для підвищення міцності доцільне додаткове подрібнення структури сталі. В практиці виробництва сталевого прокату застосовують різні способи зміцнення з одночасним подрібненням структури:

- гарячу обробку тиском з більшим обтисненням при знижених температурах – *контрольована прокатка*;
- термічну обробку з прискореним охолодженням від високих температур – *гартування, часто з наступним відпуском*;
- спеціальне мікро легування у поєднанні з термічною обробкою – *карбонітридне зміцнення*.

Усі ці способи у різній мірі реалізуються на практиці, проте найпоширенішим є карбонітридне зміцнення, що ґрунтується на введенні до сталі у невеликих кількостях сильних карбідо – та нітридоутворювальних

елементів з обов'язковою термічною обробкою. Це забезпечує зміцнення у результаті дисперсного виділення карбонітридів у поєднанні з сильним подрібненням зерна сталі, що дозволяє при значному підвищенні механічної міцності зберегти та, навіть, суттєво збільшити опірність крихкому руйнуванню. При цьому додатки елементів карбідо – та нітридоутворювальних елементів у сумі не перевищують 0,2% за масою.

Таблиця 4 – Перелік сталей для деталей з прокатного металу згідно ДБН В 2.3-14:2006 «Мости та труби. Правила проектування»

Марка сталі	Клас міцності	Товщина прокату, мм, вкл.		ГОСТ, ТУ
		листового	фасонного	
16Д	235	До 20		ГОСТ 6713
16Д	225	21...40		
16Д	215	41...60		
15ХСНД	345	8...15		
15ХСНД	335	16...50; 16...32		
15ХСНД	390	8...15		
10ХСНД-2	390	8...40	8...15	
15ХСНД-12	345	До 32	До 10	
10ХСНД-12	390	До 40	До 15	
14Г2АФД	390	До 50	-	
15Г2АФДпс	390	До 32	-	
09Г2Д-12	295Д	До 32	До 20	
09Г2СД-12	295Д	21...32		
09Г2СД-12	325Д	Свыше 10 до 20		
09Г2Д-12	325Д	До 10	-	
09Г2СЮЧ-2	325	8..50		ТУ У 322-16-127
09Г2СЮЧ-2	355	8...50	-	
09Г2СЮЧ-3	390	8...50	-	
Е36	355	8...50	-	
Е40	390	8...40	-	
06ГБД	355	8...50	-	ТУ У 27.1-05416923-
06ГБД	390	8...50	-	
06Г2БД	440	8...50	-	
06Г2БД	490	8...50	-	

Для зміцнення низьколегованої феритно-перлітної сталі можуть бути використані карбіди та нітриди алюмінію, ванадію, ніобію, танталу, берилію, лантану, молібдену та вольфраму. З економічних і технологічних міркувань в

Україні з цією метою застосовують в основному карбонітриди ванадію, ніобію та нітриди алюмінію.

У табл. 5 наведено хімічний склад, а в табл.6 – механічні властивості за ГОСТ 19281-89 трьох марок листової високоміцної феритно-перлітної сталі з карбідонітридним зміцненням, яку понад 30 років використовують в Україні для виготовлення зварних металоконструкцій [10].

Таблиця 5 – Хімічний склад феритно-перлітних сталей з карбонітридним зміцненням у %, за масою

Марка сталі	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	V	N
14Г2АФ(Д)	0,12-0,18	0,3-0,6	1,2-1,6	≤0,40	≤0,30	0,15-0,30	0,07-0,12	0,015-0,025
15Г2АФДпс	0,12-0,18	≤0,17	1,2-1,6	≤0,30	≤0,30	0,2-0,4	0,08-0,15	0,015-0,030
16Г2АФ(Д)	0,14-0,20	0,3-0,6	1,3-1,7	≤0,40	≤0,30	0,15-0,30	0,08-0,14	0,015-0,025

Таблиця 6 – Механічні властивості феритно-перлітних сталей з карбонітридним зміцненням

Марка сталі	Товщина прокату, мм	σ_T , МПа	σ_b , МПа	σ_s , %	КСУ, ДЖ/см ² , за температури, °С		
		не менше					
14Г2АФ(Д)	До 5	390	540	20	-	-	-
	5-10	390	540	20	44	34	29
	10-32	390	540	20	39	29	29
	32-50	390	540	20	39	29	29
15Г2АФДпс	До 5	390	540	19	-	-	-
	5-10	390	540	19	44	34	29
	10-20	390	540	19	39	29	29
	20-32	390	540	19	39	29	29
16Г2АФ(Д)	До 5	440	590	20	-	-	-
	5-10	440	590	20	44	34	29
	10-32	440	590	20	39	29	29
	32-50	410	570	20	39	29	29

Примітка: Вигин до паралельності сторін $d=2a$.

Варто відмітити, що низьколеговану сталь, зміцнену ванадієм, можна піддавати гарячому вальцюванню, штампові тощо. При цьому температурний режим гарячого деформування (температура нагріву та швидкість

охладження) повинен (по можливості) відповідати прийнятому режиму нормалізації, тобто число таких нагрівів повинне бути обмеженим (2...4) задля попередження виникнення локальних ділянок з великою зернистою мікроструктурою. Перевищення температур нагріву, прийнятих для нормалізації, або збільшення швидкості охолодження підвищує міцність, проте знижує пластичність, в'язкість та холодноламкість внаслідок утворення несприятливої мікроструктури.

У той же час встановлено, що сталі, леговані ванадієм, не слід використовувати для конструкцій, що піддаються високому відпустку. У такому металі після термообробки ударна в'язкість знижується, критична температура крихкості переміщується в бік позитивних температур на 15...20°C. Аналогічно впливає високий відпуск і на властивості сталі, легованої ніобієм.

Відносно висока вартість ванадію спричинила необхідність зміни хімічного складу мікро легованих сталей. Останнім часом набув поширення як мікро легувальний елемент ніобій, який удвічі дешевший ванадію. В такому варіанті забезпечується дрібнозернистість структури та, в певній мірі, дисперсне зміцнення (проте воно менше, ніж при використанні ванадію). У товщинах до 40 мм мікролегована ніобієм сталь має властивості класу міцності С345 ($\sigma_T > 345 \text{ Н/мм}^2$; $\sigma_B > 490 \text{ Н/мм}^2$), властивості нормалізованої сталі з ванадієм у товщинах до 60 мм відповідає класу С390 ($\sigma_T \geq 390 \text{ Н/мм}^2$; $\sigma_B \geq 540 \text{ Н/мм}^2$).

Під впливом економічних факторів було розроблено сталі для відповідальних конструкцій з ніобієм та ванадієм. Найпоширенішу з таких сталей 09Г2ФБ поставляють після контрольованої прокатки. Вона вирізняється високою чистотою за шкідливими домішками та газами. Особливу увагу приділяють ретельному видаленню з твердого розчину азоту, що ослаблює ефективність дії ніобію.

У промисловості знаходять застосування природно леговані сталі 15ХСНДА та 10ХСНДА нового покоління для металевих конструкцій з високими експлуатаційними властивостями, що відрізняються від відомих аналогів (15ХСНД та 10ХСНД) мікро легуванням V та Nb, зниженим вмістом C, S та P (табл. 7). Службові характеристики прокату з названих сталей наведено в табл. 8.

Таблиця 7 – Хромонікелеві сталі для металевих конструкцій*

Сталь	клас міцності	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	V	Nb
15ХСНД	С345	0,18	0,70	0,70	0,035	0,035	0,90	0,60	0,40	-	-
10ХСНД	С390	0,12	0,80	1,10	0,035	0,035	0,90	0,80	0,60	-	-
15ХСНДА	С345	0,15	0,90	0,70	0,010	0,015	0,60	0,50	0,40	0,12	0,06
10ХСНДА	С390	0,10	0,95	1,10	0,010	0,015	0,60	0,50	0,60	0,12	0,04

* Максимальна масова частка елементів, %

Завдяки мікролегуванню вдається одночасно підвищити міцність за механізмом дисперсного твердіння та пластичність шляхом подрібнення кінцевої феритно-перлітної структури.

Таблиця 8 – Службові характеристики прокату зі сталей 10ХСНДА, 15ХСНДА

Марка сталі	Товщина прокату, мм	Механічні характеристики			КСУ, ДЖ/см ² , за температури, °С			Кут загину, град.	Частка волокнистого старіння в розламі, %
		σ_T , МПа	σ_b , МПа	σ_5 , %	-60	-20	-20, після механічного старіння		
10ХСНДА	12	568...	429	27,0...	135...	147...	148...160	120	100
		574		30,0	159	162			
10ХСНДА	16	565...	370...	27,0	60...	62...	90...125	120	100
		567	386	27,3	85	74			
15ХСНДА	16	528...	370...	26,6	160...	168...	174...217	120	95...
		532	377	29,3	207	200			
10ХСНДА	20	558...	359...	28,8...	200...	198...	209...222	120	97...
		569	397	35,8	209	205			
	32	593...	400...	27,0...	161...	170...	213...237	120	95...
605	405	37,0	230	218					

Однак при зварюванні мікро легованих сталей перехід у наплавлений метал V та Nb, а також нітридів і карбонітридів може сприяти підвищенню твердості наплавленого металу та чинити несприятливий вплив на ударну в'язкість та температуру переходу металу шва у крихкий стан. Крім того, при

підвищений погонних енергіях зварні з'єднання згаданих сталей чутливі до низькотемпературного окрихчуванню за лінією сплавлення. Для попередження негативних наслідків зварювання – зниження погонної енергії, вибір відповідних зварювальних матеріалів.

Сталь з карбонітридним зміцненням є доволі ефективною й при виробництві прокату з використанням гартування та відпустку. При цьому легування Mo, V, сприяючи збереженню високої міцності після термообробки, дозволяє суттєво знизити ступень знеміцнення та ширину знеміцненої зони зварного з'єднання (сталі марок 12X2CMФ, 12ГН2МФАД, 12ХГН2МФБАЮ класу міцності С590 та С590К).

Протягом останнього десятиріччя у світі розроблено нове покоління марок економно легованих сталей підвищеної та високої міцності [14]. Ці сталі містять до 0,12% вуглецю, обмежену кількість Mn, Mo, Nb, Ti, В, додатково можуть бути леговані Ni, Cr (у сумарній кількості до 3...4%).

У *табл.9* наведені хімічний склад і механічні властивості деяких марок нового покоління з межею текучості 440...900 МПа [14]. Ці сталі відрізняються вищою холодноламкістю та економнішим легуванням у порівнянні з відомими матеріалами. Проте при роботі з ними необхідні підвищені вимоги до вибору зварювальних матеріалів та технології зварювання. При цьому вирішальною вимогою є зниження долі основного металу у шві з метою мінімізації в ньому сумарного вмісту $\Sigma Al, V, Nb$. Цього легко досягти при ручному та механізованому зварюванні. При зварюванні під флюсом для цих сталей радять умову змінити, збільшивши $\Sigma Al, V, Nb < 0,15\%$, оскільки в інших випадках це пов'язане зі значним ускладненням технологічних процесів та зниженням їх продуктивності.

Для конструкцій спеціальних споруд – комплексів доменних цехів, спеціальних резервуарів і газгольдерів, морських стаціонарних платформ, залізничних та авто мостів тощо – є відомчі рекомендації з вибору марок сталей.

Таблиця 9 – Хімічний склад та механічні властивості сталей нового покоління підвищеної та високої міцності

Марка сталі	Частка елементів									
	C	SI	MN	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti	Nb
AC-50	0,08	0,27	1,37	-	-		0,01	0,054	0,007	0,03
06Г2БД	0,04	0,20	1,30...	<20	<0,03	0,05...	0,15...	0,02...	0,02	0,03...
	0,08	0,50	1,60							
09Г2СЮЧ	0,08	0,30	1,90...	-	-	-	0,30...	0,04...	-	-
	0,11	0,60	2,20							
S460ML	0,115	0,37	1,55	0,04	0,03	0,002	-	0,031	-	-
09ХГ2СЮч	0,08	0,30	1,90...	1,00	-	-	-	0,04...	-	-
	0,11	0,60	2,20	1,30						
HSLA-80	0,05	0,37	0,48	0,68	1,02	0,22	1,26	0,015	0,004	<0,03
10Г2НФБ	0,10	0,40	1,60...	-	0,30..	-	-	-	0,02...	0,03...
		0,60	1,80							
09ХГНФБ	0,10	0,40	1,60...	0,70.	0,70..	0,2	-	-	0,02...	0,03...
		0,60	1,80	0,80	0,90					
15Г2МФЮТРА	0,12	0,17	1,40...	-		0,01...	-	0,02...	0,02...	-
	0,18	0,40	1,80							
Alform 700 MC	0,08	-	1,35		-	-	-	0,03	0,18	0,06
Bissalloy 80	0,17	0,40	1>15	0?85	-	-	-	-	-	-
8СНТ80 ОР	0,11	0,27	0,86	0,54	0,88	0,44	0,24	-	-	-
NK-HITEN-780B	0,12	0,25	0,92	0,44	1,04	0,32	0,21	-	-	-
09ХГ2НМФБ	0,10	0,40	1,60...	0,60..	0,70..	0,20	-	-	0,02..	0,03..
		0,60	1,80	0,80	0,90					
15Г2ХНМФЮТРА	0,12	0,17	1,40...	0,30..	0,30..	0,10	-	-	0,02..	0,02..
	0,18	0,40	1,80	0,60	0,60	0,25				
8АНТ80	0,13	0,24	0,75	0,55	0,94	0,40	0,25	-	-	-
StE 890	0,16	0,45	1,00	0,80	2,00	0,50	-	-	-	-
WELDOX-900	0,15	0,22	1,40	0,25	-	0,50	-	-	-	-
DQ-125	0,11	0,10	0,79	0,52	1,46	0,52	0,03	0,05	0,01	<0,03

% за масою										
N_2	V	B	S	P	решта	P_{cm}	$C_{ЭКВ}$ $ПВ$	Механічні властивості		
								$\sigma_{0,2}$, МПа	$T_{испр.}$, °C	KCV, ДЖ/см ²
0,002	0,003	0,001	0,001	0,008	W, Sn, Zr	0,16	0,32	440	-50	>40
<0,012	0,04 0,07	-	<0,010	<0,020	-	0,13 0,20	0,33 0,43	440	-70	>50
-	-	-	<0,015	<0,020	Ce, Ca	0,20 0,27	0,41 0,51	450	-70	>30
0,005	0,05	-	0,003	0,014	-	0,21	0,39	460	-20	>31
-	-	-	<0,001	<0,020	Ce, Ca	0,23 0,30	0,59 0,73	550	-70	>30
0,01	0,005	0,002	0,002	0,004	W, Sn, Zr	0,22	0,46	572	-50	>59
-	0,08	-	<0,01	<0,020	Ca, Zr, P3M	0,20 0,22	0,40 0,46	590	-50	>40
-	0,08	-	<0,01	<0,020		0,24 0,27	0,60 0,68	685	-50	>40
-	0,08	0,001 0,005	<0,01	<0,020		0,20 0,32	0,37 0,51	685	-40	>30
-	0,02	0,002	0,002	0,006	-	0,17	0,31	700	-20	>40
-	-	0,002	<0,001	<0,020	-	0,29	0,59	750	-20	>60
-	0,05	0,0016	0,004	0,013	-	0,25	0,53	751	-35	196
-	-	0,001	0,002	0,008	-	0,25	0,51	768	-40	200
-	0,08	-	<0,01	<0,020	Ca, Zr, P3M	0,27 0,32	0,59 0,68	785	-50	>40
-	0,16	0,001 0,005	<0,01	<0,02		0,22 0,38	0,48 0,72	785	-40	>30
-	0,05	0,002	0,01	0,013	-	0,26	0,53	834	-35	147
-	0,1	-	<0,02	<0,025	-	0,30	0,74	890	-60	>27
-	-	0,002	<0,01	<0,030	-	0,30	0,53	900	-40	>40
0,002	0,07	0,001	0,001	0,003	W, Sn, Zr	0,25	0,56	903	-50	>40

Сталі для зварних машинобудівних конструкцій. Вуглецеві сталі є одним з найпоширеніших матеріалів для зварних машинобудівних конструкцій. Їх застосовують при виготовленні основ рам, станин, поперечин та інших вузлів та деталей технологічного устаткування, транспортних засобів тощо. Температурна область застосування вуглецевих сталей охоплює діапазон $-40...425^{\circ}\text{C}$ в залежності від складу, ступеня розкислення та структурного стану після термообробки.

З міркувань забезпечення сприятливої зварюваності вміст вуглецю обмежують на рівні $0,22...0,25\%$. Рідше використовують вуглецеві сталі із вмістом вуглецю до $0,30...0,40\%$.

Хімічний склад та механічні властивості деяких марок низько вуглецевих сталей, що широко використовуються в машинобудуванні, наведено в *табл. 10*.

Основними вимогами, що висуваються до властивостей зварних з'єднань з вуглецевих сталей, є їх рівномірність з основним металом та відсутність дефектів у металі шва та зоні термічного впливу.

Низьковуглецеві сталі мають сприятливі показники зварюваності та можуть бути всі види зварювання, що мають промислове значення. Зварні шви мають необхідну стійкість проти утворення кристалізаційних тріщин внаслідок зниженого вмісту вуглецю. Згадані тріщини ймовірні лише при несприятливій формі провару, зокрема у кутових швах, першому шарі багат шарового стикового шва, односторонніх швах з повним проваром кромки, коли вміст вуглецю наближається до верхньої межі ($0,22...0,25\%$).

Низьковуглецеві низьколеговані сталі застосовують у різноманітних зварних машинобудівних конструкціях взамін вуглецевих, забезпечуючи зниження металомісткості на $20...50\%$.

Вміст вуглецю в низьколегованих сталях не перевищує $0,23\%$. У залежності від легувальних елементів, сумарна присутність яких не перевищує 5% , розрізняють марганцевисті, кремніймарганцевисті, хромкремніймарганцевисті та інші сталі, наведені в *табл. 11* [21]. За вмістом S та P ці сталі відносяться до якісних.

Таблиця 10 – Хімічний склад та механічні властивості низько вуглецевих сталей

Марка сталі	Межі вмісту хімічних елементів, %			$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	КСУ, МДж/м ² , при		
	C	Mn	Si			+20°C	-20°C	-40°C
ВСтЗкп	0,14-0,22	0,30-0,60	≤0,07	200-240	340-470	-	-	-
ВСтЗпс	0,14-0,22	0,40-0,65	0,05-0,17	210-250	380-490	0,3	0,3	0,3
ВСтЗсп	0,14-0,22	0,40-0,65	0,12-0,30	210-250	380-490	0,5	0,5	-
ВСтЗГпс	0,14-0,22	0,80-1,10	0,15	210-250	380-500	0,3	0,3	0,3
ВСт4пс	0,18-0,22	0,40-0,70	0,12-0,30	240-270	420-540	0,4	0,4	0,4
ВСт6пс	0,28-0,37	0,50-0,80	0,05-0,17	-	-	-	-	-
ВСт6пс	0,28-0,37	0,50-0,80	0,15-0,35	-	-	-	-	-
08кп	≤0,01	0,25-0,45	≤0,03	-	260-370	-	-	-
10	0,07-0,14	0,35-0,65	0,17-0,37	≤220	≤380	-	-	-
20	0,17-0,24	0,35-0,65	0,17-0,37	≤240	-	-	-	-
15К	0,12-0,20	0,35-0,65	0,15-0,30	210-230	380-490	-	0,3	-
16К	0,12-0,20	0,45-0,75	0,17-0,37	240-260	410-500	0,7	0,3	-
18К	0,14-0,22	0,55-0,85	0,17-0,37	280-470	440-580	0,6	0,3	-
20К	0,16-0,24	0,35-0,65	0,15-0,30	230-250	410-520	0,6	0,3	-

В останнє десятиріччя розширюється виробництво та застосування рафінованих сталей шляхом електрошлакового, вакуумного переплаву, обробки сталей у ковші синтетичними шлаками з метою зниження присутності сірки у їхньому складі для підвищення опірності утворенню шаруватих (ламінарних) тріщин.

У країнах СНД при виготовленні **посудин високого тиску, вантажопідйомного та шахтного устаткування, екскаваторів та дорожніх машин, а також мостів** набула поширення сталь марки 09Г2СЮч, що випускається комбінатом „Азовсталь”.

Листовий прокат сталі 09Г2СЮч поставляють товщиною 8...40мм зі стабільним хімічним складом (табл.12). Для забезпечення корозійної стійкості сталі (що важливо для мостобудування) до складу може додатково вводитися

мідь у кількостях 0,3...0,6%. Хімічний склад сталі у поєднанні з термічною обробкою забезпечує гарантовані механічні властивості (табл.13).

Таблиця 11 – Хімічний склад та механічні властивості низьколегованих сталей

Марка сталі	Вміст хімічних елементів, % (за масою)				Механічні властивості		
	C	Si	Mn	Інші	σ_{T2} , МПа	σ_B , МПа	KCV^{-40} ? МДж/м ²
					не менше		
14Г	0,12-0,18	0,17-0,37	0,7-1,0	-	290	460	0,35
19Г	0,16-0,22	0,17-0,37	0,8-1,15	-	320	480	0,35
09Г2	≤0,12	0,17-0,37	1,4-1,8	-	310	450	0,30
14Г2	0,12-0,18	0,17-0,37	1,2-1,6	≤0,3	340	470	0,35
18Г2	0,14-0,20	0,25-0,55	1,2-1,6	≤0,3	360	520	0,40
12ГС	0,09-0,15	0,5-0,8	0,8-1,2	-	320	470	-
16ГС	0,12-0,18	0,4-0,7	0,9-1,2	-	330	500	0,4
17ГС	0,14-0,20	0,4-0,6	1,0-1,4	-	350	500	0,4
09Г2С	≤0,12	0,5-0,8	1,3-1,7	-	350	500	0,4
10Г2С1	≤0,12	0,9-1,2	1,3-1,65	(0,15-0,3) Cu≤0,3Ni)	380	520	-
10ХСНД	≤0,12	0,8-1,1	0,5-0,8	(0,6-0,9)Ce, (0,5-0,8)Ni, (0,4-0,65)Cu	400	540	0,5
15ХСНД	0,12-0,18	0,4-0,7	0,4-0,7	(0,6-0,9)Ce, (0,3-0,6)Ni, (0,2-0,4)Cu	350	500	0,3

Сталь 09Г2Сч не має у своєму складі вартісних легуючих компонентів (нікелю, хрому), проте забезпечує високий опір крихкому руйнуванню до температури -70°C (на зразках Шарпі). Ударна в'язкість прокату товщиною 12 мм: $KCV^{-40} = 87-150$ Дж/см², $KCV^{-70} = 55-69$ Дж/см².

Таблиця 12 – Хімічний склад листової сталі 09Г2СЮч

Вміст елементів, масова частка, %						
Вуглець	Марганець	Кремній	Алюміній	Церій	Сірка, не більше	Фосфор, не більше
0,08-0,11	1,9-2,2	0,3-0,6	0,025-0,065	0,002-0,005	0,015	0,02

Таблиця 13 – Механічні властивості листової сталі 09Г2СЮч

Межа текучості, МПа	Межа міцності, МПа	Відносне подовження, %	Ударна в'язкість КСУ/КСV ⁷⁰ , Дж/см ²
325-450	480-570	19	69/29

Механічні властивості металу шва зварних з'єднань зі сталі 09Г2СЮч наведено в табл. 14.

Таблиця 14 – Механічні властивості металу шва зварних з'єднань зі сталі 09Г2СЮч

Зварювальний матеріал	Товщина прокату мм	Межа текучості Н/мм ²	Тимчасовий опір розриву, Н/мм ²	Відносне подовження, %	Ударна в'язкість КСУ, Дж/см ² , за температури, °С		
					+20	-40	-70
Дріт Св-10НМА Ø3 мм, флюс АН-22	17	543	668	23,6	160	158	52,7
	40	520	665	24,4	172	123	53,9
Дріт Св-10НМА Ø3 мм, флюс АН-43	17	454	562	29,0	214	100	36,7
	40	444	533	29,0	154	114	63,0
Дріт Св-08Г2С Ø1,6мм, суміш 80% Аг+20%СО2	17	461	556	33,7	204	127	60,6
	40	489	571	21,6	-	131	122

Для країн ЄС, США, Японії є характерним розширення марочного складу та номенклатури сталевих прокатів, що дозволяє розв'язувати сучасні завдання в енергетиці, машинобудуванні, транспортній галузі, суднобудуванні, будівництві морських платформ тощо.

З 1960 р. у локомотиво- та вагонобудуванні нашої країни почалося широке таких низьколегованих сталей як 09Г2С, 10Г2С1 тощо. Їх застосування

взамін вуглецевих дозволило зекономити понад 2 млн.т металопрокату (в масштабах СНД), підвищило надійність і міцність вагонів при одночасному покращенні важливого експлуатаційного показника – коефіцієнта тари. *Слід зауважити, що в Україні вагони експлуатаційного парку мають вантажопідйомність 68...71 т, масу тари 20...23 т, осьове навантаження 215...225 кН. У той же час у США серійні вагони мають вантажопідйомність 90...100 т, масу тари 19...20 т, осьове навантаження 300...315 кН.*

Подальше збільшення вантажопідйомності вітчизняних вагонів, їх надійності та довговічності, зменшення коефіцієнту тари та витрат на ремонтно-відновлювальні роботи можна досягти застосування сталей класу міцності 400...500 МПа. Вважають перспективними для цього сталі з карбонітридним зміцненням. Для підвищення корозійної стійкості зварних конструкцій вагонів і локомотивів розширюють застосування високолегованих неіржавіючих сталей (хромонікелевих Х18Н10Т і без нікелевих 10Х13Г18ДУ).

У світовому **автомобілі** - , **приладобудуванні** та будівництві широко застосовують сталеві оцинковані листи, які отримують електролітичним та гарячим способами. На листи з метою покращення коефіцієнта тертя при штамповці наносять тонкі органічні плівки. Гарні властивості мають двохшарові цинкові покриття із зовнішнім шаром зі сплаву $Fe-Zn$ (15-25% Fe). В якості матеріалу для зварних автомобільних баків запропоновані сталеві листи, на яких традиційне покриття 92% Pb + 8% Sn замінено безсвинцевими покриттями 90% Zn + 10% Fe + хроматна плівка + шар мастильного покриття, та безхромисті покриття, що отримують електроцинкуванням. Із внутрішнього боку на лист наносять тонкий шар органічної смоли, що добре опирається дії палива. Додатки в нього металевих порошоків сприяє покращенню зварюваності, а наявність мастильного шару забезпечує кращий коефіцієнт тертя при штампуванні.

Інтенсивний розвиток **теплової енергетики** в світі в умовах реалізації стратегії мінімізації збитків, що наносяться доквіллю, вимагає підвищення температури в топках та робочих органах котельних агрегатів, що, крім

зниження виділення шкідливих оксидів, супроводжується підвищенням їх ККД. Виходячи з цього, гостро постає питання вибору зварюваних сталей, що працюють в умовах понад критичних параметрів пару ($T < 600-610^{\circ}\text{C}$, $P \leq 30-31$ МПа). В *табл. 15* наведені марки найбільш вживаних вітчизняних і закордонних теплостійких сталей.

Таблиця 15 – Найпоширеніші марки трубних теплостійких сталей і критичні умови їх експлуатації

Марка сталі	Стандарт на сталь	Країна виробництва	Максимальна температура, $^{\circ}\text{C}$	Максимальний тиск пари, МПа
13CrMo44	DIN 17175	Німеччина	520	-
10CrMo9 10	DIN 17175	Німеччина	540...545	20...28
P22/T22	ASTM, A-335/ A-199 < A-213	США		
12X1МФ	ТУ 14-3-460-75	СНГ	545-550	21-25,5
14MoV63	DIN 17175	Німеччина		
Сталь 15128 (CrMoV)	N415128	Чехія/Словаччина		
15X1М1Ф	ТУ 14-346-75	СНД	550	25,5
15CrMoV510	VdTUV-Wb506	Німеччина	550...560	20
X20CrMoV121	DIN 17175	Німеччина		

Згідно досліджень, функціональні можливості сталі з феритною α - граткою, зміцненої додатковим легуванням Cr, Mo, V, W, вичерпуються при $T > 600^{\circ}\text{C}$. Вище цієї температури більш ефективними виявляються високолеговані аустенітні сталі та сплави. Проте виготовлення вузлів теплоенергетичного устаткування з аустенітних сталей пов'язане з низкою проблем, спричинених їх фізичними властивостями та зварюваністю. Останні визначили необхідність створення нових сталей з α – граткою, що мають достатню технологічність та придатність для роботи при $T \sim 560...600^{\circ}\text{C}$. Такі феритно-мартенситні сталі типу P91/T91(X10CrMoVNb91) та P92 були розроблені в США та отримали світове визнання. Ці сталі характеризують

достатньо низька теплоємність, низькі коефіцієнти теплопровідності та термічного розширення, задовільна тривала міцність, корозійна стійкість, пластичність, зварюваність, оброблюваність та придатність найпоширеніших ультразвукового та магнітно-порошкового методів для контролю зварних з'єднань, а також більш низька (у порівнянні з високолегованими) вартість.

Завдяки вищому рівню тривалої міцності застосування сталі P91 замість раніше використовуваних низьколегованих сталей та сталі X20 дозволяє зменшити товщини стінок компонентів котельних установок (рис.4).

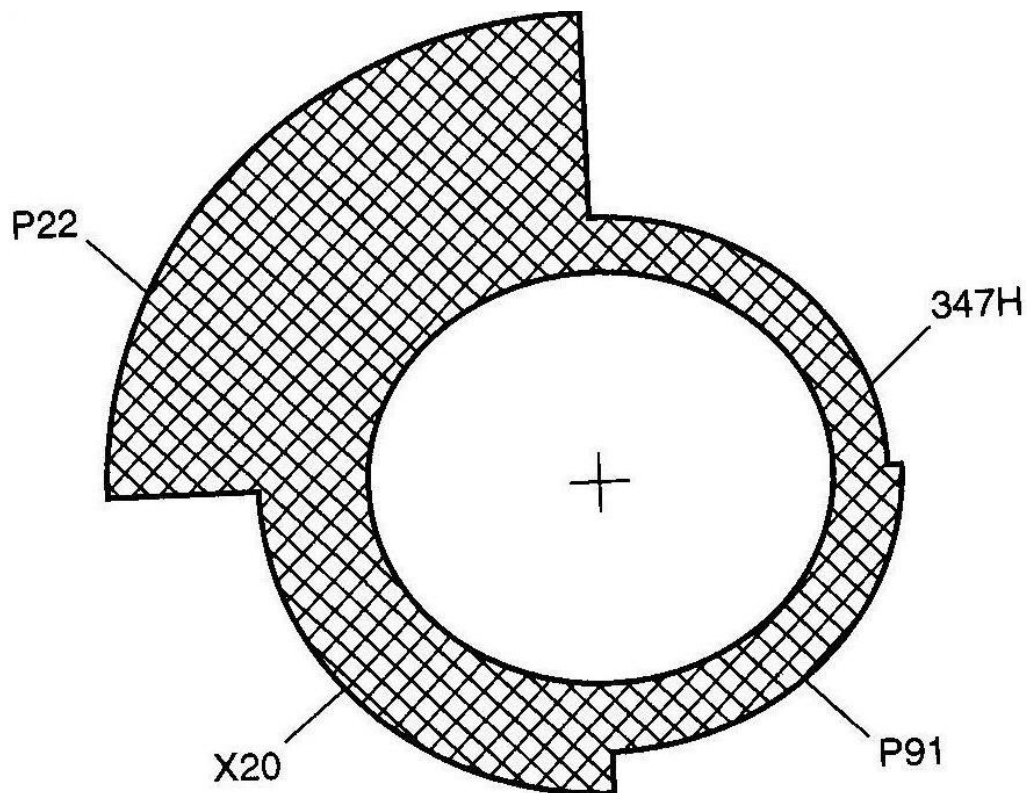


Рисунок 4 – Товщини стінок паропроводів з різних марок сталі для транспортування пари з $T=600^{\circ}\text{C}$ і тиском 25 МПа

Це забезпечує значне зниження маси конструкцій та економію ресурсів при їх виготовленні. Випробуваннями під навантаженням від 610 до 630°C встановлено, що при орбітальному зварюванні TIG з подаванням гарячого присадного дроту показники вищі, ніж при подаванні холодного дроту та при TIG/MIG ручному зварюванні.

Алюміній та алюмінієві сплави. У зварних конструкціях в основному використовують напівфабрикати (листи, профілі, труби тощо) з деформівних

сплавів. Сплави АМг1 – АМг6, що містять в якості основного легуючого елемента магній (0,9...6,3%), широко використовують в якості конструкційного матеріалу в судно-, вагоно-, автомобілебудуванні та в нафтогазовій промисловості. В системі легування Al-Mg розроблено нову групу сплавів з додатковим введенням скандію (до 0,25%). Такі сплави поєднують високу міцність з гарною пластичністю та експлуатаційними характеристиками, а також з достатньою корозійною стійкістю. Завдяки добрій зварюваності згадані сплави є перспективним матеріалом для виготовлення транспортних засобів і будівельних конструкцій.

В останні два десятиріччя велику увагу приділяли розробці алюміній-літійових сплавів. При додаванні 1ат.% літію густина алюмінієвого сплаву знижується на 3 – 4%, а жорсткість збільшується на таку ж величину. Тому такі сплави мають на 5...15% меншу густину у порівнянні з традиційними алюмінієвими сплавами, більшими значеннями σ_B/ρ та E/δ , доброю зварюваністю. Це робить їх доволі привабливими для авіа – та ракетобудування.

Необхідність підвищення якості з'єднань традиційних і нових алюмінієвих сплавів потребує постійного вдосконалення існуючих способів зварювання та пошуку нових альтернатив.

Зварювання алюмінієвих сплавів ТІГ ведеться переважно синусоїдальним струмом промислової частоти. Проте кращі результати забезпечує пульсуючий зварювальний струм прямокутної форми. Пульсація дуги досягається асиметрією зварювального струму, низькочастотною модуляцією змінного струму або зміною амплітуди імпульсів струму прямої полярності. Зварювання МІГ зазвичай призначають, коли необхідно виконати багат шарові шви. Для зниження пористості процес ведуть імпульсною дугою. Найсуттєвіше зменшення порожнин у наплавленому металі відмічається при захисті дуги гелієм або гелій-арговою сумішшю.

Зварювання алюмінієвих сплавів товщиною 0,8...3,0 мм плазмовою дугою зазвичай виконують на постійному струмі зворотної полярності в аргоні. При цьому якість зварних з'єднань суттєво підвищується за рахунок повного руйнування та видалення окисної плівки, покращуються умови формування

металу шва, а також різко знижується геометричний концентратор напружень на межі переходу шва до основного металу.

Зварювання тертям з перемішуванням (STIR) є новим технологічним процесом, що дозволяє отримувати з'єднання алюмінієвих сплавів без розплавлення основного металу. Для нього є характерним мале тепловкладення, що позитивно позначається на ступені знеміцнення металу, а також незначна деформація зварних виробів.

Титан та титанові сплави. Завдяки своїм унікальним властивостям титан знаходить застосування при будівництві підводних човнів, літаків, ракет та космічних літальних апаратів, автомобілів, суден малого каботажу, виробництві щогл та корпусів яхт. Використовують титанові сплави для виготовлення теплообмінної апаратури АЕС, підводних крил, гребних гвинтів, напружених елементів донної частини морських платформ, бурильних труб тощо. Серед нових областей застосування титану слід відмітити будівництво заводів з виробництва зрідженого газу та регазифікаційних терміналів (до 250 т титанового прокату на одну установку).

Пластмаси – це матеріали, отримані на основі синтетичних або природних полімерів. Зазвичай їх застосовують як конструкційний матеріал, альтернативний сталі чи алюмінію. У полімери з різною метою можна вводити наповнювачі, стабілізатори, пігмент, можна складати композиції з додатками органічних та неорганічних волокон, сіток та тканин. За структурою пластмаси поділяються на два види – *кристалічні* та *аморфні*. В залежності від поведінки полімеру при нагріванні розрізняють два види пластмас: *термопласти* – матеріали, які можна багаторазово нагрівати і вони переходять при цьому з твердого у в'язкотекучий стан, та *реактопласти*, які можуть сприймати цей процес лише одноразово. Для зварних конструкцій та деталей придатні лише термопласти.

Найрозповсюдженішими конструкційними пластмасами є групи термопластів на основі поліолефінів: поліетилену високо та низького тиску, поліпропілену, поліізобутилену.

Поліетилен високого та низького тиску – кристалічні термопласти, що відрізняються міцністю, жорсткістю, температурою текучості.

Поліпропілен більш термостійкий, має більшу міцність і жорсткість. У значних обсягах використовують хлорвміщуючі пластики на основі полімерів та співполімерів вінілхлориду та вініліденхлориду.

Полівінілхлорид (ПВХ) – аморфний полімер, який в початковому стані є жорстким матеріалом. При додаванні до нього пластифікатора можна отримати дуже пластичний та добре зварюваний матеріал – пластифікат. З жорсткого ПВХ – вініл пласта – виготовляють листи, труби, прутки, а з пластикату – плівку, шланги та інші вироби. З ПВХ виготовляють також спінені матеріали (пінопласти).

Значну групу полімерів та пластмас на їх основі складають *поліаміди*. Це переважно кристалічні термопласти з чітко виразною температурою плавлення. До поліамідів відносяться, зокрема, полі капролактама, капрон та поліамід-66.

Найбільш відомі з групи фторлонів отримав політетрафторетилен-фторлон-4 (*фторопласт-4*). На відміну від інших термопластів при нагріванні він не переходить у в'язкотекучий стан навіть при температурі деструкції (~415°C), тому його зварювання вимагає особливий прийомів.

Натепер хімічною промисловістю освоєно випуск добре зварюваний фторлонів : Ф-4М, Ф-40, Ф-42 тощо. Зварні конструкції з фторвміщуючих пластиків мають виключно високу стійкість до агресивних середовищ та можуть сприймати робочі навантаження в широкому діапазоні температур.

На основі акрилової та метакрилової кислоти виготовляють акрилові пластики. Найбільш відомою в практиці похідна на їх основі – пластмаса полі метилметакрилат (торгова марка „плексиглас”). Це пластики, що мають високу прозорість, використовуються як надпровідні вироби (у вигляді прутків, листів).

Знайшли застосування також співполімери метилметакрилату та акрил нітрилу, що мають більшу прозорість і твердість. Усі пластики цієї групи добре зварюються.

Високою прозорістю відрізняється група пластиків на основі полістиролу. Цей полімер добре зварюється тепловими способами.

Для виготовлення зварних конструкцій переважно в електротехнічній промисловості використовують співполімери стиролу з метилстиролом, акрилонітролом, поліметилметакрилатом та акрилнітрил-бутадієн-стирольні (АБС) пластики. Останні відрізняються від крихкого полістиролу високою ударною міцністю та теплостійкістю.

У залежності від температури полімери можуть знаходитися у трьох фізичних станах: склоподібному (I), високоеластичному (II) та в'язкотекучому (III), які визначаються термомеханічною кривою полімерів (рис.5). Температура переходу з високо еластичного стану у в'язкотекучий називається температурою текучості T_T , з високо еластичного стану в склоподібний – температурою скловання T_C . Температура розкладення T_P – температура переходу полімеру у в'язкотекучий стан при виникненні незворотної деформації. Ділянка III визначає можливий температурний інтервал переробки виробу та зварювання.

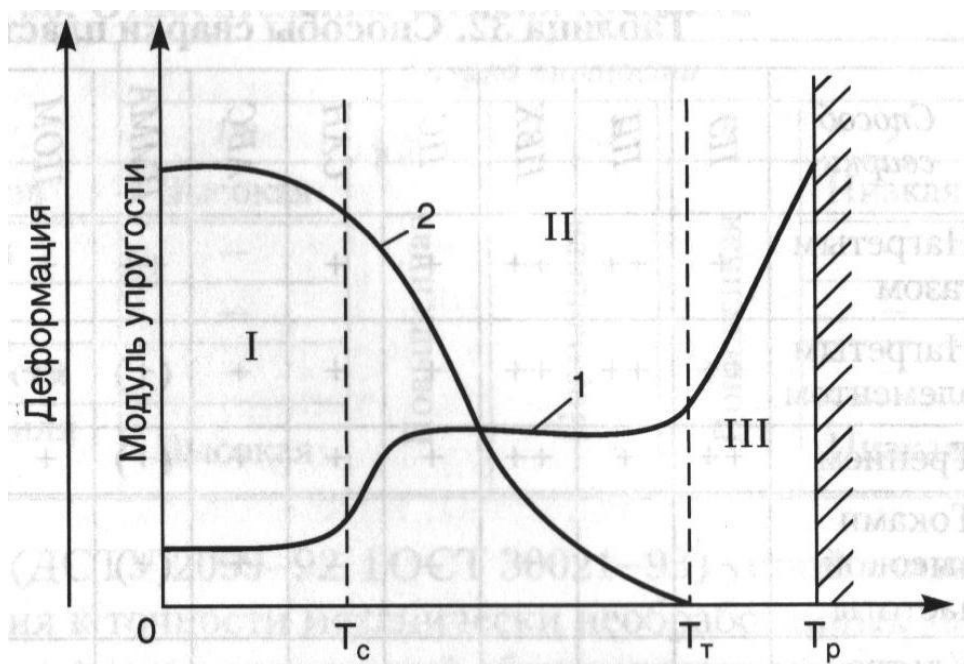


Рисунок 5 – Термомеханічна крива аморфного полімеру (1) та крива зміни модуля його пружності в залежності від температури (2)

Термопласти поставляють для переробки у гранулах розміром 3 – 5 мм. Основними технологічними процесами виготовлення напівфабрикатів та деталей з них є екструзія, лиття, пресування, каландрування, що виконуються у температурному інтервалі в'язкотекучого стану.

Процес зварювання термопластів полягає в активації зварюваних поверхонь деталей, що знаходяться вже в контакті або приводяться у контакт після та одночасно з активацією. Основні способи зварювання для поєднання поліетилену (ПЕ), поліпропілену (ПП), полівінілхлориду (ПВХ), полістиролу (ПС), співполімеру стиролакрилнітрилу (САН), співполімеризату акрил нітрил-бутадієн-стиролу (АБС), поліметилметакрилату (ПММА), поліацеталю (ПОМ), поліаміду (ПА), полікарбонату (ПК), політетрафторетилену (ПТФЕ) наведено в *табл.16*.

Таблиця 16 – Способи зварювання пластмас

Спосіб зварювання	ПЕ	ПП	ПВХ	ПС	САН	АБС	ПММА	ПОМ	ПА	ПК*	ПТФЕ	ПФЕП
Нагрітим газом	+	++	++	+	+		++	+	(+)	++	-	-
Нагрітим елементом	++	++	++	+	+	+	(+)	++	+	+	(+)	+
Тертям	++	+	++	+	+	+	(+)	+	+	++	(+)	+
Струмом високої частоти	-	-	+	-	-	+	(+)	-	+	+	-	-
Ультразвуком	-	-		+	(+)	+	(+)	+	+	+	(+)	-

++ – застосовується переважно; + – застосування можливе; (+) – застосовується рідко; -- не застосовується.

* При зварюванні ПК струмами високої частоти вимагається дуже висока частота.

Широке застосування отримали трубопроводи з поліетиленових та полівінілхлоридних труб для транспортування агресивних продуктів, у тому числі нафти та газу із вмістом сірководню та вуглекислоти, а також хімічних (неароматичних) реагентів у хімічному виробництві. Резервуари та цистерни для перевезення кислот і лугів, травильні ванни та інші посудини облицьовують пластмасовими листами. Поєднаними за допомогою зварювання. Герметизація пластиком приміщень, забруднених ізотопами, покриття підлог лінолеумом

також відбувається за допомогою зварювання. Консервація продуктів у туби, коробки та банки, пакування товарів та поштових відправлень різко пришвидшується із застосуванням зварювання.

У хімічному машинобудуванні зварюють корпуси та лопатки різноманітних змішувачів, корпуси та ротори насосів для перекачування агресивних середовищ, фільтри, вальниці з фторопласту. З полістиролу зварюють освітлювальну арматуру, з капрону – не електропровідні шестерні. Валики, муфти, штоки, з фторлону – не змащувальні вальниці, витіснювачі палива тощо.

1.3 Забезпечення точності виготовлення зварних конструкцій

Точність є одним з найголовніших показників, що характеризує якість зварної конструкції. Під точністю конструкцій розуміють відповідність форми, розташування поверхонь та геометричних розмірів вимогам креслень та технічних умов.

Стандарт „Конструкції зварні. Розряди точності, граничні відхилення лінійних розмірів, допуски форми та розташування поверхонь” (ДСТУ 2099-92) встановлюють єдині вимоги до точності механічно необроблених машинобудівних зварних конструкцій загального призначення, що виготовляються з низько вуглецевих та низьколегованих сталей.

Стандарт передбачає шість розрядів (від 1т, висока точність, 1– 5), що встановлюють граничні відхилення лінійних розмірів, допуски круглості та профілю поздовжнього перерізу, у тому числі чотири розряди, що визначають допуски прямолінійності та перпендикулярності. Основні закономірності побудови рядів числових значень граничних відхилень і допусків стандарту наступні:

- граничні відхилення лінійних розмірів у межах одного розряду точності змінюються пропорційно A (добуток крайніх значень інтервалу номінальних розмірів) з коефіцієнтом зниження 1,2;

- граничне відхилення в одному інтервалі розмірів збільшується за геометричною прогресією зі знаменником $\sim 1,52$, при цьому значення відхилень 5-го розряду у вісім разів більше значення розряду 1т;

- розрахункові значення відхилень у декількох випадках округлені до чисел, зручних для відліку за шкалами вимірювальних засобів.

Граничні відхилення лінійних розмірів L_p , допуски прямолінійності P_p вимірюються у діапазоні номінальних розмірів зварних конструкцій від 100 до 40000мм.

Зміни та значення допусків прямолінійності P_p та перпендикулярності P_n в межах одного ступеня точності відповідають значенням переважних чисел ряду R_a 10. Допуски площинності P_n розраховано пропорційно площам контрольованих поверхонь. Допуски круглості та профілів поздовжнього перерізу K_p прийнято рівними 50% від допуску на лінійні розміри відповідних розрядів. Можливі декілька варіантів вибору/призначення точності виготовлення конструкції (на етапі проектування, з урахуванням вимог до виробу):

- перший – виготовити конструкцію високої точності та мінімізувати (у деяких випадках повністю виключити) наступну механічну обробку перед складанням виробу;

- другий – виготовити зварну конструкцію зниженої точності, а потрібну точність виробу досягти за рахунок механічної обробки, яка у багатьох випадках є достатньо трудомісткою;

- третій – комбінація першого та другого, коли виготовляють конструкцію нормальної точності з невеликим обсягом наступної механічної обробки.

У сучасному виробництві віддають перевагу першому та третьому варіантам. Розв'язання проблеми забезпечення заданої точності зварної конструкції досягається за рахунок комплексного підходу при її проектуванні та виготовленні (рис. 6).



Рисунок 6 – Схема впливу різних факторів при проектуванні та виготовленні на точність зварних конструкцій

Так, у конструкціях високої та підвищеної точності виготовлення допуски на товщину стінок мінімальні або взагалі відсутні. Конструкції зниженої точності інколи вимагають значного збільшення товщини стінок. Це спричиняє зниження коефіцієнта використання металу та підвищення трудомісткості виготовлення виробу.

Застосування в елементах та вузлах конструкції сталей різної міцності/зносостійкості, а також сталей різних властивостей і товщин для різних елементів однієї конструкції – суттєвий чинник підвищення точності. Викладений принцип покладено в основу технології виробництва зварних складаних тонколистових заготовок “Tailored Blanks”. Вона передбачає розкрій листових заготовок різних марок сталей з різними товщинами та якістю поверхні на задані елементи., які зварюють у єдиний лист/заготівку для наступного штампування. При виготовленні таких заготовок застосовують контактне роликоне зварювання з роздавлюванням кромок, аргонодугове TIG та лазерне зварювання. Такі зварні складані заготівки (ЗСЗ) найбільш поширені у виробництві легкових авто.

ЗСЗ використовують також при виготовленні циліндричних деталей (валів, валів-шестерен, валиків, осей, пальців). Такі комбіновані заготівки

отримують зазвичай зварюванням тертям з високо – та менш міцних сталей, а також різнорідних матеріалів. Після зварювання ЗСЗ з метою подальшого формоутворення піддають холодному або гарячому штампуванню. При цьому, завдяки конструкції заготовок, питоме зусилля штампування знижується на 25...50%.

Мінімізацію об'єму наплавленого металу досягають зменшенням перерізу та довжини зварних швів, використанням економічних профілів прокату, гнутих елементів, точних заготовок, заміною ручного дугового зварювання на механізоване та автоматичне, застосуванням зварювання тиском взамін зварювання плавленням. *Встановлено, що для забезпечення заданого розряду точності зварної конструкції, що виготовляється із застосуванням дугового зварювання, точність лінійних розмірів її деталей повинна бути вищою приблизно на два розряди.*

Схеми складання. При послідовному складанні та зварюванні елементів потрібної точності виготовлення конструкції досягають, застосовуючи проміжні операції виправлення. Схему повного складання конструкції з наступним зварюванням зазвичай використовують для порівняно простих виробів або виробів середньої складності, які складаються з невеликого числа деталей з легко приступними для виконання з'єднаннями. При цій схемі точність забезпечують створенням жорсткого контуру зібраної конструкції.

При паралельно-послідовній схемі складання загальні деформації всієї конструкції помітно зменшуються, так як жорсткість вузлів завжди більше жорсткості окремих деталей. У цьому випадку легше виконати правку деформованих вузлів, ніж повністю звареної конструкції.

Деформації, напруження та переміщення. Традиційно розрізняють способи попередження та способи усунення зазначених величин. До способів попередження відносять регулювання теплового стану металу зварного з'єднання, активне навантаження зварюваних елементів та компенсацію деформацій.

Регулювання теплового стану металу з'єднання зводиться до зменшення об'єму металу, що підлягає пластичному деформуванню, що виникає на стадії нагріву металу. Для цього використовують наступні шляхи:

1. Застосування тих видів зварювання, які потребують меншого тепловкладення, зокрема, механізоване дугове замість ручного дугового, контактне замість дугового, зварювання тертям замість дугового та контактного, лазерне, плазмове, електронно променеве тощо.

2. Призначення мінімальних перерізів зварних швів та зменшення об'ємів наплавленого металу. *У загальному обсязі випуску зварних конструкцій лише 30–40% швів є розрахованими, а 60–70% – конструктивні (з'єднувальними).* В якості заходів із зниження загальної маси наплавленого металу слід виділити використання гнутих і гнуто-зварних профілів, гнутих елементів та профілів прокату, підвищення точності заготовок та забезпечення точного складання під зварювання тощо.

3. Регулювання теплових процесів за рахунок додаткового охолодження зони зварювання водою, водно-повітряною сумішшю, спеціальними тепло відвідними підкладками та пастами.

4. Застосування попереднього та супутнього підігрівів з метою зменшення різниці температур між окремими точками зварюваного виробу. Це призводить до зменшення пластичних деформацій та напружень.

Активне навантаження зварюваних елементів виконують як під час зварювання, так і після нього. Найвідомішими способами є розтягнення та вібронавантаження деталей в процесі зварювання, ударне деформування (проковування) шва.

1.4 Механізація та автоматизація зварювального виробництва

Механізація та комплексна автоматизація технологічних процесів є магістральним напрямком розвитку сучасного виробництва. Проте застосування високого рівня автоматизації у зварювальному виробництві диктує необхідність реалізації таких технічних рішень, які будуть економічно ефективними при відносно невеликих партіях випуску виробів, тобто мова йде про гнучку автоматизацію, яку реалізують за допомогою роботів.

Натепер у зварювальному виробництві промислово розвинених країн за допомогою роботів:

- виконують зварювальні та інші технологічні операції;
- реалізують завантаження та розвантаження зварювальних установок, верстатів, машин та іншого обладнання (завантажувально-розвантажувальні роботи);
- проводять складання заготовок перед зварюванням (складальні роботи);
- транспортують заготовки та зварні конструкції (складання, контроль, складування тощо – транспортні роботи).

Роботи застосовують найчастіше для роботизації дугового та контактного точкового зварювання у складі робото технологічних комплексів (РТК), дільниць і ліній. До складу РТК входять маніпуляційна система, зварювальне устаткування, пристрій керування та вимірювальні пристрої системи геометричної та технологічної адаптації. Вантажопідйомність роботів для дугового зварювання зазвичай 5...10 кг, для контактного – 50...90 кг.

У кінематичній структурі маніпулятора зварювального інструменту розрізняють ланки, що виконують *переносні* (регіональні) та *орієнтувальні* (локальні) переміщення. Переносні переміщення необхідні для перенесення робочої точки інструменту (точки зварювання) в межах робочої зони маніпулятора інструменту, орієнтувальні – для забезпечення заданої орієнтації інструменту відносно виробу у заданій точці робочої зони.

Для дугового зварювання найчастіше застосовують роботи зі сферичною кутовою та прямокутною системами координат, а для контактного точкового – роботи зі сферичною та сферичною кутовою.

Для керування маніпуляторами виробу можна застосовувати як системи керування маніпулятором інструменту (власне робота), так і індивідуальну систему. Задача керування ланками маніпуляційної системи може бути позиційною або контурною.

При *позиційному* управлінні забезпечується лише певне значення координат робочого органу у заданих точках. *Координатне* управління полягає у забезпеченні руху робочого органу за траєкторією будь-якої форми із заданою

швидкістю. Контурне управління необхідне при зварюванні швів складної форми, а також при наплавленні складних кромek та поверхонь.

Роботи найчастіше застосовують при обсягах випуску від 1000 до 6000 однакових виробів на рік, тобто в умовах серійного та велико серійного виробництва конструкцій невеликих та середніх габаритів. При цьому роботами доцільно зварювати у першу чергу корпусні, рамні. Гранчасті конструкції та зварні деталі машин зі швами будь-якої форми, по-різному орієнтованими один відносно одного.

Роботи для контактного точкового зварювання найбільше використовують в автомобільній промисловості, де зварюють листові конструкції з товщиною листів 0,6...1,2 мм зі швидкістю до 60 точок за хвилину із силою струму у вториннім колі не менше 4 кА та зусиллям стискання електродів 3,0...3,5 кН. Це зазвичай універсальні роботи з п'ятьма-шістьма ступенями рухливості.

Зварні конструкції, що рекомендовані до обробки роботами з малим числом ступенів рухливості, можна умовно розділити на три групи, в залежності від їх форми, розмірів та розташування зварних швів.

Перша група – великогабаритні каркасно-листові конструкції (стінки автофургонів, борти вантажівок): шви прямолінійні, розташовуються в одній площині, паралельно або перпендикулярно один одному.

Друга група – площинні конструкції, що складаються з гнутих або штампованих деталей і листів з елементами насичення (двері та стінки електрошаф, елементи пультів): зварні шви розташовуються на декількох паралельних рівнях, відстань між якими не більше 250 мм.

Третя група – об'ємно-листові зварні конструкції коробчастого типу, що складаються з гнутих елементів металопрокату з деталями насичення (корпус пральної машини, холодильника, сушильної шафи). У конструкціях цієї групи зварні шви розташовуються у трьох та більше площинах.

Для зварювання конструкцій кожної з груп рекомендується свій тип роботи технічного комплексу.

Контрольні питання до теми 1

1. Виділіть найдієвіше шляхи зниження собівартості зварних конструкцій.
2. Які фактори є визначальними якістю зварних з'єднань?
3. За якими ознаками класифікують сталі для будівельних конструкцій?
4. Як реалізовано диференціацію застосування сталей за ступенем розкисленості?
5. Охарактеризуйте низьколеговані сталі підвищеної міцності
6. Наведіть приклади сучасних способів додаткового зміцнення сталевого прокату
7. Які сталі доцільно використовувати при виготовленні посудин високого тиску, вантажопідйомного та шахтного устаткування, дорожніх машин, мостів?
8. Проаналізуйте шляхи вдосконалення сталевих листів для автомобілебудування
9. Наведіть перспективні марки сталей для теплової енергетики та дайте їм характеристику.
10. Які нові алюмінієві сплави з'явилися останнім часом? Які способи отримання їх якісних з'єднань?
11. Як поділяються пластмаси за структурою, за поведінкою при нагріванні?
12. Які конструкційні пластмаси є найрозповсюдженішими?
13. В яких фізичних станах можуть знаходитись полімери при нагріванні? У якому температурному інтервалі виконують їх зварювання?
14. Які можливі варіанти призначення точності при виготовленні конструкцій застосовують?
15. У чому суть технології виготовлення складаних заготовок "Tailored Blanks"?
16. Наведіть способи попередження деформацій та напружень при зварюванні
17. Які роботи за системою координат найчастіше застосовуються для дугового зварювання, а які – для контактного точкового?
18. Як поділяють зварні конструкції, що рекомендовані до обробки роботами з малим числом ступенів рухливості?

2 Електродугові технології

З найбільш важливих для зварювальних технологій форм розряду до сталих належать *тліючий* і *дуговий*, до несталих – *іскровий* розряд. Всі ці форми тісно зв'язані між собою і переходять з однієї в іншу.

Тліючий розряд використовують для нагріву заготовок при дифузійній зварюванні, а також термообробці.

Електрична дуга отримала вельми широке застосування в металургії, зварюванні і споріднених технологіях (наплавлення, різання, напилення, зміцнення). Зварювальні дуги дозволяють ввести в оброблювані матеріали питому потужність 10^5 Вт/см² при плямі нагріву 1...10 мм². Така концентрація енергії забезпечує місцевий нагрів і розплавлення багатьох металів і сплавів.

Іскровий розряд широко використовують для запалювання електричної дуги і як джерело нагріву при електроіскровому легуванні.

2.1. Дугове зварювання плавким електродом

Основними чинниками, що визначають результат механізованої дугового зварювання плавким електродом, є якість електродного дроту, ефективний захист зони рідкої ванни, правильний вибір джерел живлення і зварювального устаткування в цілому, професійна кваліфікація зварювальника і технічна культура виробництва. Зупинимося детальніше на перших трьох чинниках.

Електродний дріт. Для споживача важливими є такі характеристики електродного дроту:

- допустимі відхилення від номінального діаметру;
- постійність хімічного складу;
- стан поверхні;
- забезпечення надійності струмопідвода;
- тимчасовий опір розриву;
- діаметр намотування та власне напруження „закручування”;
- розміри касет і катушок для дроту;
- вид намотування та упаковки.

Зварювальний дріт суцільного перерізу для дугового зварювання сталей плавким електродом до останнього часу в Україні і Росії випускають за ГОСТ 2246-70 «Дріт сталевий зварювальний. Технічні умови».

Стандарт передбачає виготовлення 76 марок дроту, зокрема: 6 марок низьковуглецевого, 30 марок легованого та 40 марок високолегованого. Крім того, існують десятки марок сталевих зварювального дроту, які випускають в невеликих кількостях за окремими технічними умовами.

У даний час в Україні вже набули чинності міжнародні стандарти, що стосуються виробництва електродного дроту. Одним з таких гармонізованих стандартів є стандарт ДСТУ ISO 14341:2004 (ISO 14341:2002, IDT) «Матеріалі зварювальні. Електродні дроти та наплавлений метал для дугового зварювання у захисному газі плавким електродом нелегованих і дрібнозернистих сталей. Класифікація». Вимоги до постачання зварювального дроту визначені стандартом ДСТУ ISO 544:2004 (ISO 544:2003, IDT) «Матеріалі зварювальні. Технічні умові постачання зварювальних присадних матеріалів. Тип продукції, розмірі, допуски та маркування».

Згідно ГОСТ 2246-70 основними показниками якості дроту є граничні відхилення від діаметру і овальності, розміри мотків, якість поверхні.

Слід зазначити, що гармонізований міжнародний стандарт не допускає овальності, а поля допусків на граничні відхилення від діаметру значно звужені в порівнянні з вимогами ГОСТ 2245-70. Дріт Св-08Г2С, що випускається за ГОСТ 2246-70, містить більшу кількість кремнію, марганцю і вуглецю в порівнянні з дротом для зварювання в активних захисних газах (МАГ) марок G3Si1, G4Si1 (ДСТУ ISO 14341). Дріт Св-08Г2С менш технологічний і, як правило, не забезпечує постійності хімічного складу по довжині. ДСТУ ISO 14341:2004 на відміну від ГОСТ 2246-70 додатково визначає вимоги до механічних властивостей наплавленого металу шва і використовуваного захисного газу. При цьому дріт класифікують на дві групи - А і В, залежно від його хімічного складу на підставі вимог європейських норм EN і американських норм AWS. Група А класифікує дріт за межею текучості і

роботою ударного руйнування наплавленого металу, рівній 47 Дж, а група В - за тимчасовим опором розриву і роботою ударного руйнування, рівною 27 Дж.

Стан поверхні електродного дроту впливає на її корозійну стійкість, вміст газів і шкідливих домішок в зварних швах, зусилля прошовування і надійність струмопідводу.

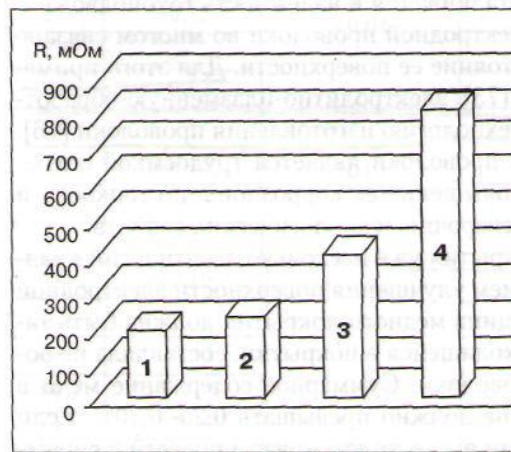
Удосконалення електродного дроту передовсім пов'язане з поліпшенням стану його поверхні. Для цього застосовують очищення, обміднення, електролітно-плазмову обробку, спеціальну технологію виготовлення дроту.

Механічне очищення дроту є трудомісткою операцією і не забезпечує підвищення його корозійної стійкості та істотне поліпшення зварювально-технологічних властивостей.

Нанесення мідного покриття вже декілька десятиліть є основним напрямом поліпшення поверхні електродного дроту. При цьому товщина мідного покриття має бути такою, щоб маса міді, яка знаходиться в покритті, складала не більше 0,10...0,15% маси дроту. Сумарний вміст міді в дроті і в покритті не повинно перевищувати 0,25...0,30%. Якщо сумарний зміст міді вищий, то це може призвести до зниження ударної в'язкості швів і підвищення небезпеки утворення в них кристалізаційних тріщин.

Для дроту діаметром 1,2 і 2,0 мм оптимальна товщина мідного покриття рівна відповідно 0,15-0,20 і 0,4-0,6 мм. Згідно технологічне мастило і мідне покриття не захищають сталевий зварювальний дріт від корозії. В той же час встановлено, що контактний опір обмідненого зварювального дроту в 50...100 разів менше цього показника у дроту, покритим технологічним мастилом.

Встановлено (рис.7), що сталевий дріт марки G3Si1 з мідним покриттям має найменший перехідний опір, у дроту з бронзовим покриттям воно майже удвічі більше, а у дроту без покриття - більше ніж у 4 рази. Підвищення товщини мідного покриття не веде до істотного зниження перехідного опору, фірма WDI використовує дріт з товщиною покриття від 0,8 до 1,3 г/м².



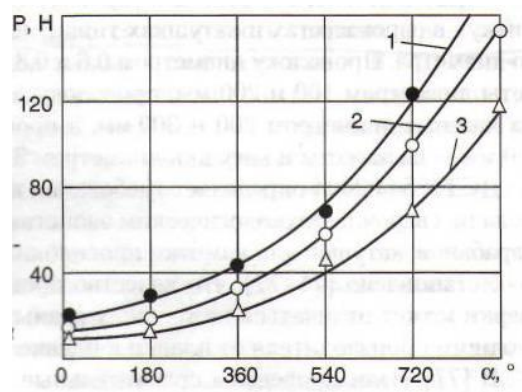
1 - медне завтовшки 2,79 г/м²; 2 - медне завтовшки 0,55 г/м²; 3 - бронзове; 4 - без покриття

Рисунок 7 – Діаграма перехідного опору R сталевого електродного дроту з різним покриттям та без нього

Тимчасовий опір розриву дроту має бути в межах 900...1100 МПа для діаметрів 0,6-0,8 мм; 800...1000 МПа для діаметрів 1,6-2,0 мм. Польський стандарт PN-88/M-69420 регламентує σ_B для дроту G3Si1 діаметром 1,2 мм величиною 750...1200 МПа. При меншому тимчасовому опорі розриву знижується жорсткість дроту і порушується стабільність його подачі по напрямних каналах зварювального устаткування, при більшому – збільшується зношування струмопровідних наконечників.

Стан поверхні зварювального дроту впливає на зусилля і рівномірність його подачі через гнучкі напрямні канали шлангових тримачів. При всіх кутах вигину шлангів зусилля проштовхування обмідненого дроту менше, ніж зусилля при проштовхуванні дроту з технологічним мастилом (рис.8).

Якість намотування зазвичай оцінюють шляхом виміру діаметру вільного витка дроту, лежачого на рівній поверхні горизонтальної плити. Для дроту діаметром 1,2-2,0 мм згаданий вище діаметр повинен знаходитися в межах 1000...1300 мм. Що стосується власної напруги «закручування» дроту, то воно повинне обмежуватися величиною, при якій кінець вільно лежачого витка дроту підводиться над рівною поверхнею горизонтальної плити на висоту не більше 20 мм.



1 – дрiт з технологiчним мастилом; 2 – обмiднений; 3 – електрохiмiчно полiрований (дiаметр 2 мм)

Рисунок 8 – Кривi залежностi зусилля проiшовування дроту P вiд стану його поверхнi при рiзних кутах вигину шлангу α

Бiльшiсть зарубiжних, а в даний час i вiтчизняних виробникiв, поставляють дрiт з намотуванням «витком до витка» в єврокасетах i котушках типу В або BS вiдповiдного дiаметру. Дрiт дiаметром 0,6 i 0,8 мм намотують на касети дiаметром 100 i 200 мм, дрiт дiаметром 1,0-1,4 мм - на касети дiаметром 200 i 300 мм, а дрiт дiаметром 1,6-2,0 мм - на касети i котушки дiаметром 300 мм.

ДСТУ 544:2004 визначає вимоги до «жорсткостi», легкостi подачi, зварювально-технологiчних властивостей дроту, розмiрiв барабанiв, котушок для намотування дроту.

Встановлено, що якiсть дроту однєї i тєї ж марки може вiдрiзнятися не тiльки у рiзних виробникiв, але i у одного виробника вiд плавки до плавки.

Були проведенi порiвняльнi дослiдження якостi 14 польських i зарубiжних обмiднених зварювальних дротiв типу G3Si1 номiнальним дiаметром 1,2 мм. Сумарний вiмiст азоту, водню i кисню у випробовуваному дротi складало вiд 61,7 до 297 ррт при допустимому 150 ррт. В той же час було встановлено, що вiмiст газiв в дротi iстотно впливає на пористiсть наплавленого металу. Якщо сумарний вiмiст азоту, водню i кисню в дротi перевищує 50 ррт, то при MAG – зварюваннi виникає загроза появи пiр. У зону зварювання газу потрапляють переважно з

технологічного мастила, що знаходиться під шаром міді. Проведені дослідження показали, що обміднений дріт покращує умови первинного збудження дуги при зварюванні. Порівняно з не обмідненим дротом час від моменту першого торкання обмідненого дроту до встановлення стабільного процесу зварювання скорочується в 2-3 рази, а кількість «помилкових» торкань дротом поверхні основного металу зменшується з 3-4 до 1-2.

При зварюванні обмідненим дротом рівень втрат металу на розбризкування нижче на 20...40% в порівнянні з рівнем втрат при зварюванні дротом, що має технологічне мастило або іржу.

Для якості зварювання електродним дротом важливе значення має вид її упаковки, яка повинна забезпечити тривале дроту збереження в різних умовах без порушення технологічних властивостей. Упаковка в інгібітований папір знижує швидкість корозії дроту з технологічним мастилом в 1,3 рази, обмідненого і електрохімічно обробленого - майже в 10 і 100 разів відповідно. Ще більш високу стійкість проти корозії при випробуваннях на відкритому повітрі забезпечило пакування в інгібітований папір з латексним покриттям.

В індустріально розвинених країнах світу об'єм споживання суцільного дроту для механізованого зварювання в середовищі захисних газів складає 50...85% від об'єму використання всіх зварювальних матеріалів. У країнах СНД цей показник хоча і має деяку тенденцію до зростання, але залишається поки на рівні 15...26%.

Основними операціями сучасного виробництва суцільного дроту є:

- підготовка поверхні катанки;
- перше волочіння катанки;
- друге волочіння дроту з одночасним її обмідненням;
- намотування дроту на катушки.

Довгий час вважалося, що сталь, отримана з чавуну, володіє вищими властивостями, ніж сталь зі скрапу. Завдяки вакуумуванню і іншим технологіям, вживаним в сталеплавильному виробництві, в даний час гарантовано отримання сталі з високими і стабільними фізико-механічними

характеристиками, що не поступаються характеристикам сталі з чавуну, але яка при цьому має значно меншу вартість.

Найважливішим технологічним прийомом, що забезпечує високу якість катанки, став процес контрольованого її охолодження після плющення. Завдяки цьому процесу на поверхні катанки утворюється окалина, що легко видаляється.

Перше волочіння («сухе») здійснюють на прямоточних дев'ятикратних станах, які забезпечують достатнє змащування дроту, постійне його охолодження, мінімальну напругу в дроті. У комплект устаткування сухого волочіння входять великовантажні намотувальні пристрої із спеціальними приймачами, що виключає необхідність зупинки стану.

Друге волочіння дроту суміщене з процесом його обміднення. При цьому висувають підвищені вимоги до кількості мастила на поверхні дроту після першого волочіння. Мастила повинно бути досить для волочіння, але вона не повинна залишатися на поверхні перед обмідненням.

Для нанесення мідного покриття на поверхню сталевого зварювального дроту зазвичай використовують достатньо економічну технологію *контактного міднення*, засновану на відмінності електродних потенціалів заліза (-0,44 В) і міді (+0,34 В). При зануренні заліза в розчин мідного купоросу (Cu_2SO_4) під дією різниці електрохімічних потенціалів залізо переходить в розчин, а мідь, виділяючись з розчину, осідає на поверхні сталевого дроту. Для ущільнення мідного покриття дріт піддають додатковій деформації при волочінні із застосуванням рідкого мастила.

З метою збільшення продуктивності дріт у волочильному стані намотують у великі котушки (500-800 кг). Подальше перемотування на менші котушки здійснюють на інших робочих місцях. При цьому споживачі дроту віддають перевагу *пошаровому* намотуванню, оскільки це чинить позитивний вплив на процес механізованого зварювання.

Найслабкішим місцем для обміднених дротів є міцність зчеплення мідного шару з поверхнею дроту. Під час подачі дроту при контакті з

подавальними роликками і від тертя в каналах відбувається відлущування міді, канали забиваються і дріт подається нерівномірно. Тому продовжується пошук альтернативних мідненню технологій поверхневої обробки електродного дроту. До однієї з таких відноситься електролітно-плазмова обробка поверхні. Після такої обробки сталевого зварювального дроту вміст водню в ньому в 2-3 рази менше в порівнянні з необробленим. Згадана обробка забезпечує повне видалення з поверхні дроту технологічного мастила, оксидів і іржі. Електролітно-плазмову обробку можна також використовувати для підготовки поверхні дроту з алюмінію, міді і їх сплавів.

Останнім часом на ринку набув поширення дріт Aristorod фірми «ЕСАБ». Поверхня цього дроту обробляється за спеціальною технологією ASC (Advanced Surface Characteristics). У результаті застосування цієї технології вдалося виключити обміднення поверхні і при цьому поліпшити подачу дроту, зменшити знос контактних наконечників, гарантувати стабільний процес зварювання при низькому розбризкуванні. Поверхня дроту захищена від корозії. Переваги дроту Aristorod особливо виявляються в молібденвмісних дротах, обміднення яких ускладнене.

Більше півстоліття промислового виробництва порошкового дроту. У світі використовують дві технології виготовлення порошкового дроту: *із стрічки* та *із зварної трубки*. У першому випадку технологічний процес виготовлення порошкового дроту складається з операцій формування стрічки в калібрувальних роликках у початкову трубчасту заготовку і заповнення її шихтою. Ці операції виконують у спеціальному формуючому пристрої з живильниками шихти. Потім із сформованої заготовки волочінням на прямоточному шестикратному волочильному стані отримують дріт заданих розмірів.

Порошковий дріт діаметром понад 1,8 мм зазвичай виготовляють за шість протяжок з достатньо високою продуктивністю. Для виготовлення порошкового дроту менших діаметрів потрібне багаторазове волочіння або використання інших прямоточних восьми-дванадцятикратних станів, що знижує продуктивність.

У світі найбільш ходовий діаметр порошкового дроту – 1,2 мм. Як відомо, порошковий дріт малих діаметрів дозволяє виконувати зварювання в будь-якому просторовому положенні, зварювати тонкий метал, знижувати катети кутових швів.

Волочіння порошкового дроту з високолегованою оболонкою пов'язане з великими труднощами із-за швидкого наклепу поверхні стрічки, малого числа проходів при волочінні, необхідності проведення проміжного відпалу рекристалізації, унаслідок чого різко знижується продуктивність виготовлення порошкового дроту і виникають жорсткі обмеження по складу компонентів шихти, особливо рудномінеральної її частини.

Одним з напрямів скорочення числа протяжок при волочінні стрічок з низьковуглецевої та високолегованої сталі є використання ультразвукових коливань. При накладенні на волоку ультразвукових коливань, співвісних з напрямом волочіння, отримували дріт із стрічки з низьковуглецевої сталі з коефіцієнтом заповнення 15...20% і діаметром 1,3 мм за п'ять проходів. При цьому на волоках, оснащених акустичними системами, обриви не були зафіксовані, поверхня отриманого дроту була чиста, без задирок і наварів.

Зазвичай як недолік порошкового дроту, що виготовляється із стрічки, відзначають підвищену вірогідність утворення пор в швах, спричинених наявністю порожнин у дроті. Підвищує вірогідність утворення пор також волога, що потрапила до наповнювача при зберіганні дроту, та мастило й іржа, сліди якої є на металевій стрічці.

Основними етапами технологічного процесу виготовлення порошкового дроту із зварної труби є:

- виготовлення початкової труби високочастотним зварюванням і подальший контроль герметичності зварного з'єднання;
- попередня підготовка агломерацією флюсового наповнювача із суміші порошкоподібних компонентів;
- заповнення каліброваної труби флюсовим сердечником за допомогою вібрації;

- контроль заповнення внутрішньої порожнини труби флюсовим сердечником перед волочінням;
- волочіння з проміжним відпалом заповненої заготівки до готового діаметру;
- нанесення на поверхню дроту мідного покриття товщиною 0,15...0,20 мкм і його опресовування, 100% контроль заповнення готового дроту;
- перемотування готового дроту на споживчі котушки, пакування.

Операція світлого відпалу рекристалізації дроту з герметичною оболонкою перед остаточним волочінням забезпечує повне видалення залишкової вологи з сердечника флюсу.

До переваг безшовного порошкового дроту порівняно з вальцьованим дротом з негерметичним поздовжнім стиком відносять:

- абсолютну захищеність флюсового сердечника від можливого насичення вологою з атмосфери в процесі зберігання протягом тривалого часу навіть у неупакованого дроту;
- відсутність необхідності у повторному прожарюванні перед використанням;
- можливість обміднення поверхні і поліпшення ковзання дроту по напрямному каналу зварювального устаткування;
- покращену подачу дроту, необов'язкове використання чотирьохроlikової системи подачі, можливість роботи з напівавтоматами, призначеними для подачі дроту суцільного перерізу;
- знижений знос струмопідвідного наконечника і стабільніше горіння дуги за рахунок постійного надійного контакту рухомого дроту з наконечником;
- підвищену пластичність і ударну в'язкість металу швів за рахунок низького вмісту дифузійного водню в наплавленому металі (менше 5 мл/100 грам).

Такий дріт забезпечує високі механічні властивості металу шва і застосовується при виготовленні відповідальних зварних конструкцій (табл.17).

Вітчизняний дріт ПП-АН59, ПП-АН63, ПП-АН69 призначена для зварювання вуглецевих і низьколегованих сталей масового призначення, а ПП-АН61, ПП-АН67 - для зварювання високоміцних низьколегованих сталей. Шви, виконані цими дротами, характеризуються гарною формою, а процес

зварювання – малою кількістю бризок і аерозолів.

Таблиця 17 – Характеристики безшовного порошкового дроту

Марка дроту, класифікація за EN, сертифікація	Типовий хімічний склад, %	Типові механічні властивості наплавленого металу у стані після зварювання
Megafil 710M T 46 4 M M1 H5 Діаметр 1,0...2,4 мм BV, LR, DNV, RINA, FORCE, GL, DB	C – 0,05 Mn – 1,30 Si – 0,70	$\sigma_{0,2} \geq 470$ МПа $\sigma_B = 550 \dots 650$ МПа $\sigma \geq 27\%$ $\alpha_{H_{-40}} > 60$ ДЖ/см ²
Megafil 713 R T 46 2 P C1 H5 T 46 4 P M1 H5 Діаметр 1,0...1,6 м TUV, DB, GL, Controlas, BV, LR, DNV, RINA, PRS, FORCE, ABS	C – 0,05 Mn – 1,30 Si – 0,50 Ni – 0,20 Ti – 0,03	$\sigma_{0,2} \geq 460$ МПа $\sigma_B = 550 \dots 650$ МПа $\sigma \geq 22\%$ $\alpha_{H_{-40}} > 60$ ДЖ/см ²
Megafil 821 R T 50 4 1 Ni P C1 H5 T 50 6 1 Ni P M1 H5 Діаметр 1,0...1,6 м TUV, DB, GL, BV, LR, DNV, RINA, PRS, FORCE, ABS	C – 0,05 Mn – 1,30 Si – 0,50 Ni – 0,70 Ti – 0,03	$\sigma_{0,2} \geq 500$ МПа $\sigma_B = 550 \dots 690$ МПа $\sigma \geq 22\%$ $\alpha_{H_{-40}} > 47$ ДЖ/см ²
<i>Примітка. Рекомендовані галузі застосування – суднобудування, виготовлення посудин, що працюють під тиском, трубопроводів, інженерних споруд</i>		

При розплавленні дротів ПП-АН59 і ПП-АН63 рутилового типу утворюються швидкотвердіючі короткі шлаки. Вони придатні для зварювання за всіма просторовими положеннями.

Типовий хімічний склад наплавленого металу та механічні характеристики металу шва, виконаного згаданими та закордонними дротами, наведені в *таблицях 18, 19*.

Таблиця 18 – Типовий хімічний склад наплавленого металу, мас. %

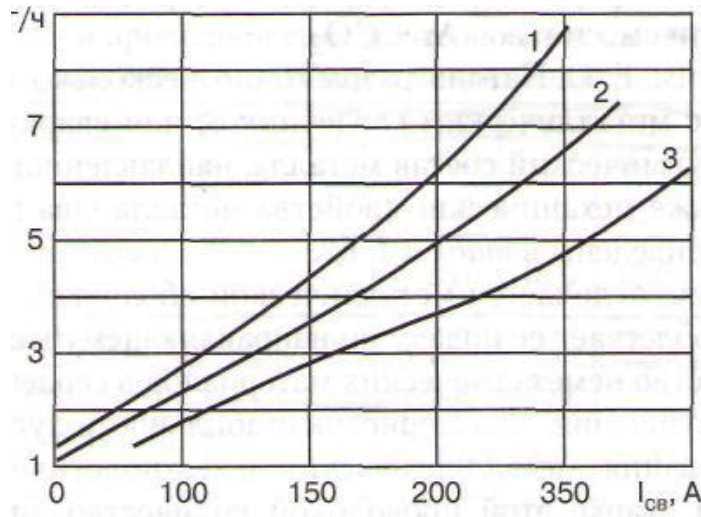
Марка дроту	Вуглець, не більше	Марганець	Кремній	Нікель	Сірка, не більше	Фосфор, не більше
ПП-АН59	0,12	1,10-1,60	0,35-0,55	0,30-0,70	0,03	0,03
ПП-АН61	0,12	1,10-1,50	0,30-0,50	1,30-1,70	0,03	0,03
ПП-АН63	0,12	1,00-1,50	0,30-0,70	-	0,03	0,03
ПП-АН69	0,12	1,30-1,50	0,30-0,60	-	0,03	0,03
91K2-H	0,060	1,40	0,30	1,80	0,010	0,010
PZ6103	0,03-0,07	1,20-1,60	0,75-1,05	-	0,025	0,025
PZ6113	0,04-0,08	1,00-1,50	0,30-0,70	-	0,025	0,025
PZ6130	0,05-0,09	1,10-1,50	0,35-0,65	-	0,025	0,025

Таблиця 19 – Механічні властивості металу шва, виконаного порошковим дротом у захисному газі

Марка дроту (розробник)	Діаметр, мм	Межа текучості МПа	Тимчасовий опір розриву, МПа	Відносне подовження, %	Ударна в'язкість, КСV	
					при темпе- ратурі, °C	ДЖ/см ²
ПП-АН59 (ІЕЗ ім. Є.О.Патона)	1,2	440	500-650	20	-30	35
ПП-АН61 (ІЕЗ ім. Є.О.Патона)	1,4	440	500-650	20	-40	35
ПП-АН63 (ІЕЗ ім. Є.О.Патона)	1,6	440	500-650	20	-20	35
ПП-АН69 (ІЕЗ ім. Є.О.Патона)	2,0	440	500-650	20	-30	35
91 K2-H (Lincoln Electric, США)	1,2; 1,6	540	620-760	17	-18	27
PZ6103 (ESAB, Швеція)	1,2; 1,4; 1,6	420	510-600	22	-20	54
PZ6113 (ESAB, Швеція)	1,2; 1,4; 1,6	420	510-590	22	-20	54
PZ6130 (ESAB, Швеція)	1,6; 2,4	420	510-580	24	-40	54

Останнім часом на світовому ринкові з'явилося чимало марок порошкового дроту з металевим осердям (*металкор*) для зварювання у захисних газах, що поєднують високу продуктивність плавлення з великим виходом наплавленого металу (95...96%).

Дріт відрізняється металевою оболонкою великої товщини, що полегшує його подавання за напрямним каналом. Продуктивність наплавлення таким порошковим дротом вища, ніж при використанні традиційних марок (*рис.9*).



1- порошок з металевим осердям;

2 – те ж з рутіловим осердям; 3 – дрот суцільного перерізу

Рисунок 9 – Криві зміни продуктивності наплавлення N при використанні порошкового дроту та суцільного перерізу діаметром 1,2

Самозахисний порошок дрот використовують для проведення зварювальних робіт в умовах будівництва та монтажу металоконструкцій (табл. 20) [88].

Таблиця 20 – Характеристика самозахисного порошкового дроту

Дрiт	Діаметр, мм	Призначення
NR-203 Nickel C (Lincoln Electric)	2,0	Зварювання будівельних металоконструкцій, бурильних установок, секцій суден
NR-232 (Lincoln Electric)	1,7; 1,8; 2,0	Спорудження кораблів, барж, прибережних бурильних платформ, мостів, загальні машинобудівні роботи
NR-07 (Lincoln Electric)	1,7; 2,0	Зварювання монтажних з'єднань труб
Hobart 81Ni1 (Hobart Brothers)	1,8; 2,0	Те ж (переважно зварювання заповнюючі та облицювальних проходів)

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено самозахисний порошок дрот марок ПП-АН60 та ПП-АН-62 діаметром 1,6 мм для зварювання у всіх просторових положеннях конструкцій з вуглецевих та низьколегованих сталей, які замінюють більш дорогі закордонні аналоги.

Захист зони зварювання. При сучасних способах дугового зварювання широко використовують захист шлаками, газами та парою.

Введення до аргону 1%O₂ уже сприяє стабілізації формування шва. А при додаванні 5% перенесення металу покращується та суттєво зменшується розбризкування. Присутність слабо окислювального середовища знижує поверхневий натяг розплавленого металу, що призводить до зниження пористості та покращенню конфігурації шва.

Додавання ж до активного захисного газу гелію сприяє підвищенню жорсткості дуги, покращенню проплавлення та форми шва, що є результатом зростання напруги на дузі та збільшення її енергії.

Найбільш конкурентноспроможними є способи зварювання у сумішах на основі аргону: 18% CO₂ + 82% Ar, 20% CO₂ + 78% Ar + 2% O₂ и 12% CO₂ + 86% Ar + 2% O₂.

Якісні шви можуть бути отримані лише при надійному захисті зони зварювання. Суцільний прямолінійний струмінь, що огортає електрод, найчастіше використовують для захисту зони зварювання. Інколи застосовують боковий підвід газу, кільцевий захист, двошаровий кільцевий захист, імпульсну подачу захисного газу тощо.

У зварювальних технологіях широко використовують шлаки для захисту зони зварювання. Найповніше захист шлаками реалізують при **зварюванні під флюсом**. Згідно ГОСТ 9087-81 за способом виготовлення флюси поділяють на *плавлені, керамічні та флюси-суміші*. Хоча за технологією виготовлення *агломеровані* та керамічні флюси дещо відрізняються, у вітчизняній термінологічній практиці їх ідентифікують як флюси. Що відносяться до одного способу виготовлення.

У світі розповсюджена класифікація флюсів за хімічним складом, запропонована Міжнародним інститутом зварювання (МІЗ, *табл. 21*).

Для зварювання сталей переважно застосовують оксидні та солеоксидні флюси-шлаки. За хімічним складом шлакоутворювальної частини ці флюси

поділяють на кислі, нейтральні та основні. Для якісного визначення індексу основності флюсу B використовують формулу, рекомендовану МІЗ:

$$B = CaO + MgO + BaO + Na_2O + K_2O + CaF_2 + \\ + 0,5(MnO + FeO)/SiO_2 + 0,5(Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2),$$

де CaO , MgO та інші – масова кількість відповідної сполуки у флюсі, % ; при $B > 1,5$ флюс відносять до основного типу; при $B < 1$ — до кислого; а при $1,0 < B < 1,5$ — до нейтрального.

Таблиця 21 – Класифікація флюсів за їх хімічним складом

Символ	Основні компоненти	Тип флюсу
MS	$MnO + SiO_2 > 60\%$; $CaO < 15\%$; $ZrO_2 < 5\%$	Марганець-силікатний
CS	$CaO + MnO + SiO_2 < 60\%$; $CaO > 15\%$	Кальцій-силікатний
AR	$Al_2O_3 + TiO_2 > 45\%$	Алюмінатно-рутиловий
AB	$Al_2O_3 + CaO + MgO + CaF_2 > 55\%$; $Al_2O_3 \geq 20\%$ CaF_2 (общее содержание F) $\leq 20\%$	Алюмінатно-основний
FB	$CaO + MgO + MnO + CaF_2 > 50\%$; $SiO \leq 20\%$; CaF_2 (общее содержание F) $\geq 15\%$	Флюоритно-основний
W	Флюси, склад яких не підпадає під жоден з вище зазначених	Інші

Кислі флюси забезпечують гарні зварювально-технологічні властивості. Проте кремній та марганець відновні процеси, характерні для цих флюсів, знижують рівень механічних властивостей металу зварних швів. Основні флюси перешкоджають переходу кисню, кремнію та марганцю в наплавлений метал, але мають гірші зварювально-технологічні властивості. Нейтральні флюси поєднують властивості, характерні для кислих та основних флюсів. Узагальнену характеристику властивостей різних типів флюсів наведено в *табл.22*.

При зварюванні вуглецевих та низьколегованих сталей з тимчасовим опором $\sigma_B < 450$ МПа доцільно використовувати флюси типу MS, CS або AR, які забезпечують високу продуктивність та відмінне формування швів. При зварюванні низьколегованих сталей підвищеної міцності ($\sigma_B > 450$ МПа), до зварних з'єднань яких висувають вимогу холодостійкості при температурах нижче -20°C , необхідно використовувати нейтральні або слабко основні флюси типу CS, AR, AB.

Таблиця 22 – Властивості флюсів у залежності від основності

Властивість	MS	CS	AR	AO	FB
Індекс основності (BI)	≤0,8	0,7-1,2	0,7-1,4	1,0-2,0	≥2,0
Формування металу шва	+++	++	+++	++	+
Стійкість проти утворення пор	+	++	+	++	+++
Стійкість проти утворення тріщин	+	+	+	++	+++
Відокремлення шлакової кірки	++	++	+++	+++	+
Пригнічення виділення зварювального аерозолю	+	+	+	+++	+++
Стабільність горіння дуги	++	++	+++	+++	+
Можливість зварювання з великою швидкістю	+++	++	+++	++	+
Пригнічення кремній-відновлювального процесу	+	+	++	++	+++
Пригнічення переходу кисню в метал шва	+	+	+	++	+++
Пригнічення насичення воднем зварювальної ванни	+	+	+	++	+++
Рафінування зварювальної ванни за сіркою	+	+	+	++	+++

У таблиці прийнято наступні позначення: + - задовільно; ++ - добре; +++ - відмінно.

Для зварювання сталей більш високої міцності, щоб виключити небезпеку холодних тріщин, застосовують високоосновні флюси типу АВ или FB.

В останні десятиріччя широке розповсюдження отримали агломеровані (керамічні) флюси. Такі флюси у поєднанні з низьколегованим мало перлітним порошковим дротом дають можливість рафінувати, мікро легувати та модифікувати метал шва, керувати складом та розподілом неметалевих вкраплень, забезпечувати його більш надійний захист від впливу повітря, бо спричиняють вплив на склад газової фази в зоні горіння дуги.

Для MAG зварювання алюмінієвих сплавів застосовують флюси. Що складаються з хлоридів та фторидів лужних та лужноземельних металів (табл.23). Ці флюси легкоплавкі, малої густини, гарної змочуваності, здатні розчиняти або абсорбувати Al_2O_3 , малої гігроскопічності. Вони забезпечують стабільне горіння дуги, формування шва, потрібні механічні характеристики.

Таблиця 23 – Склад флюсів для зварювання алюмінію та його сплавів, мас.%

Складові речовини	Марка флюсів при зварюванні												
	напіввідкритою дугою						закритою дугою				електрошлаковому		
	АН-А1	МАТИ-1	МАТИ-1А	МАТИ-10	АФ-5	АН-А4	ЖА-64	ЖА-64А	ЖА-70П	ЖА-72П	АН-А301	АН-А302	АН-А304
Хлористий калій	54	34	47	30	50	57	43	38	До 46	34-40	50	40	-
Хлористий натрій	20	43	-	-	10	-	17	15	15-19	14-17	-	35	-
Кріоліт	30	23	3	2	-	-	36	43	20-44	36-46	-	-	-
Хлористий барій	-	-	-	68	40	28	-	-	-	-	20	-	-
Кварцовий пісок	-	-	-	-	-	-	4	До 1	3-5	До 1	-	-	-
Фтористий кальцій	-	-	-	-	-	-	-	3	-	4-6	-	-	15
Хлористий літій	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	20	15	-
Фтористий літій	-	-	-	-	-	7,5	-	-	-	-	8	-	25
Фтористий натрій	-	-	42	-	-	-	-	-	-	-	-	6	60
Фтористий алюміній	-	-	-	-	-	7,5	-	-	-	-	2	4	-

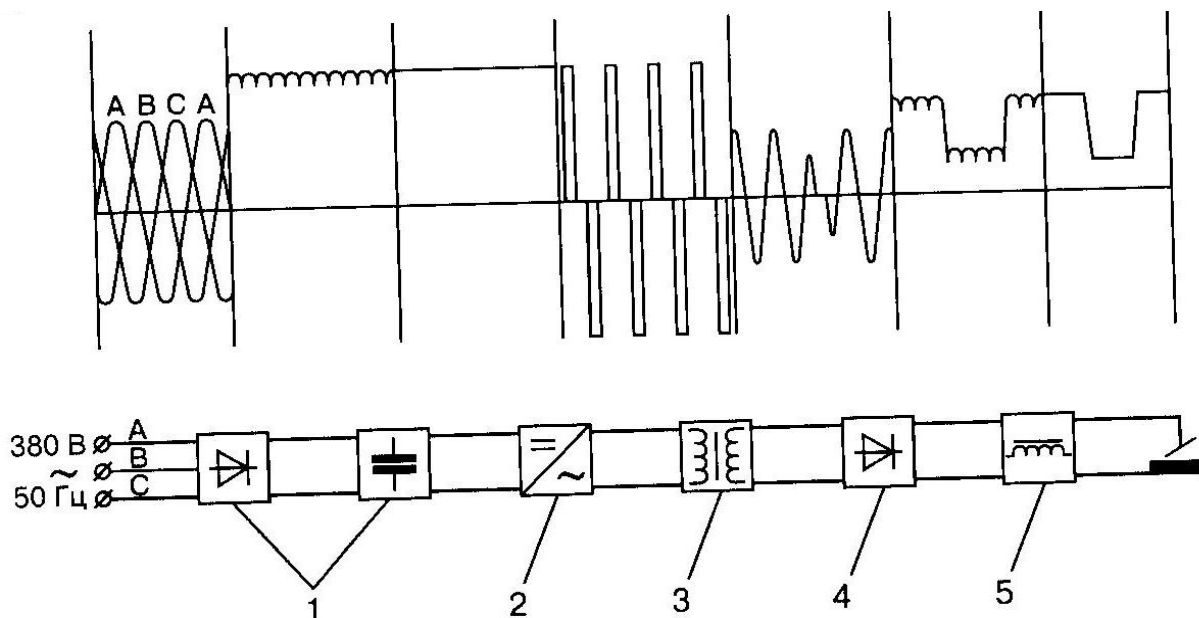
Зварювальне устаткування. Вплив джерела живлення на енергетичні та технологічні характеристики процесу зварювання визначається родом і силою струму, статичними та динамічними характеристиками трансформатора або випрямляча.

Випрямлячі з тиристорним регулюванням мають більшу надійність. Найдоцільніші варіанти — універсальні випрямлячі із жорсткими та спадними ВАХ. В моделях 300...600 А передбачається можливість, зміни нахилу жорстких ВАХ для зварювання у захисних газах.

Використовується також почастотне регулювання короткими замиканнями, яке передбачає розбивку діапазону струмів таким чином, щоб регулювати тривалість коротких замикань.

Живлення трансформатора у складі випрямляча напругою високої частоти дозволяє суттєво знизити витрати матеріалів, які ідуть на його виготовлення.

В останні роки широкого розповсюдження набули інверторні джерела живлення. Функціональну схему такого пристрою показано на *рис.10*.



1 – (мережений) випрямляч; 2 – інвертор; 3 – трансформатор;
4 – вихідний випрямляч; 5 - дросель

Рисунок 10 – Функціональна схема інвертованого джерела живлення

Напруга мережі промислової частоти (трифазної, 380 В) перетворюється вхідним випрямлячем у постійне порядку 500 В. Ця напруга, в свою чергу, перетворюється за допомогою інвертора у змінну підвищеної частоти (від одиниць до десятків кГц), яка потім надходить на знижувальний трансформатор. Вторинна обмотка трансформатора навантажена на діодний випрямляч, до виходу якого через згладжувальний дросель підключені електрод та виріб.

Живлення трансформатору напругою високої частоти дозволяє суттєво знизити витрату матеріалів, які йдуть на його виготовлення. При частоті живлячої напруги 10 кГц маса трансформатору та його габаритні розміри зменшуються приблизно у 3 рази, а при частоті 50 кГц – вже в 15...17 разів. Це сприяє суттєвому (у 25 разів) зниженню втрат потужності та зростанню ККД.

Сучасні інвертори для MIG/MAG зварювання передбачають конвекційний спосіб з роздільним регулюванням. Для стабільності властивостей реалізують сервісні функції: м'який старт, зварювання з підігрівом, імпульсна подача дроту та захисного газу.

Чоппери — інвертори, в яких передбачається накладання імпульсів на зварювальну напругу від традиційних, багато постових джерел живлення типу ВДМ. Кількість чопперів визначається потужністю випрямляча. Такі схеми доцільні для реалізації MIG/MAG і ММА.

Технології. Серед способів дугового зварювання плавким електродом процеси MIG\MAG займають провідні позиції. Серед електричних прийомів та способів вдосконалення процесів MAG-зварювання слід виділити спосіб програмування параметрів режиму за певним, наперед заданим законом.

Зварювання способом, що отримав назву „*вимушені короткі замикання*” (ВКЗ), реалізують за допомогою випрямлячів, зовнішні комбіновані вольт-амперні характеристики яких забезпечують такий режим роботи, при якому кожна їх ділянка визначає будь-яку стадію плавлення та перенесення краплі електродного металу при ручному дуговому та механізованому зварюванні.

Фірмою „Лінкольн Електрик” розроблено спосіб зварювання *STT* (“Surface Tension Transfer” – перенесення за рахунок сил поверхневого натягу). Цей спосіб відрізняється від звичайного *MAG*–зварювання можливістю прямого керування перенесенням наплавлюваного металу у зварювальну ванну. Це забезпечують швидкодіюча схема джерела живлення (випрямляча *Invertes STT*), спеціальний електронний мікропроцесорний модуль, що примусово задає необхідну силу зварювального струму, та контур зворотного зв’язку, що відслідковує зміни напруги на дузі. Протягом усього циклу перенесення краплі сила зварювального струму жорстко залежить від фази формування краплі та переходу в зварювальну ванну. Ідентифікація фази перенесення краплі відбувається за рахунок напруги, що постійно знімається з дугового проміжку.

Основна відмінність процесів *ВКЗ* та *STT* полягає у використанні випрямлячів з підвищеними динамічними властивостями. Характерний час короткого замикання з використанням традиційних випрямлячів типу *ВДУ-506*, *Вс-300* складає 10...20 мс, з випрямлячами типу *ДК* та при застосуванні способу *ВКЗ* – 5...7 мс, а з випрямлячем *Invertes* – 2...5 мс.

Способи *ВКЗ* та *STT* використовують при зварюванні неповоротних стиків трубопроводів, у автомобілебудуванні, при виконанні тонколистових конструкцій, об’єктів хімічного та енергетичного машинобудування.

Ще одним напрямків удосконалення *MIG\MAG*-зварювання є використання *імпульсного подавання електродного дроту*. Суть полягає в керуванні перенесенням краплі металу за рахунок надання електроду імпульсу подачі в напрямку ванни, під дією якого крапля розплаву набуває додаткової кінетичної енергії. Ця енергія здатна при миттєві зупинці електроду примусово відірвати краплю та забезпечити обов’язків її контакт зі зварювальною ванною. Даний спосіб подачі дроту забезпечує суттєве розширення діапазонів робочих режимів зварювання, збільшення та стабільність частоти коротких замикань дугового проміжку, різке зниження втрат металу на розбрикування.

Покращення формування швів. У тому числі при поєднанні металів малих товщин у різних просторових положеннях.

Фірмою „Фроніус” розроблено спосіб роботизованого дугового зварювання *СМТ* (Cold Metal Transfer – перенесення холодного металу), в цьому випадку блоки подавання дроту внесено до системи регулювання зварювання. Використовують два блоки подачі дроту: передній подає та відводить дріт з частотою до 70 Гц; задній блок проштовхує дріт. СМТ дозволяє виконувати зварні та паяні шви без утворення бризок, поєднувати сталь з алюмінієм. Зварювати стикові шви на металі товщиною до 0,03 мм без використання технологічної підкладки, реалізовувати тонке регулювання тепловкладення у метал.

Зварювання під флюсом. Покращення якісних характеристик процесу виконують за трьома напрямками:

Перший – подальша автоматизація процесу зварювання (надійне запалювання дуги, заварка кратера, направлення електрода за стиком, розкладка валиків тощо).

Другий – створення високоякісних зварювальних матеріалів, в першу чергу флюсів.

Третій – створення нових способів зварювання.

До першого напрямку слід віднести програмно-керуюча технологія, яка забезпечує під час зварювання змінний (необхідний) об’єм наплавленого металу в різних перерізах з’єднання по довжині з таким розрахунком, щоб розміри опуклості шва не виходили за допустимі межі. Описану технологію реалізували при односторонньому зварюванні з двостороннім формуванням швів на флюсомідній підкладці плоских полотниць з товщиною металу до 20 мм та товщиною 10 м.

Наступним різновидом стало одностороннє зварювання стикових швів з програмуванням параметрів режиму (ППР) за розробленою циклограмою. Суть полягає у циклічній зміні сили зварювального струму за певним законом при

одночасному циклічному переміщенні електроду вздовж кромки за заданим законом, що погоджується зі зміною сили струму (рис. 11).

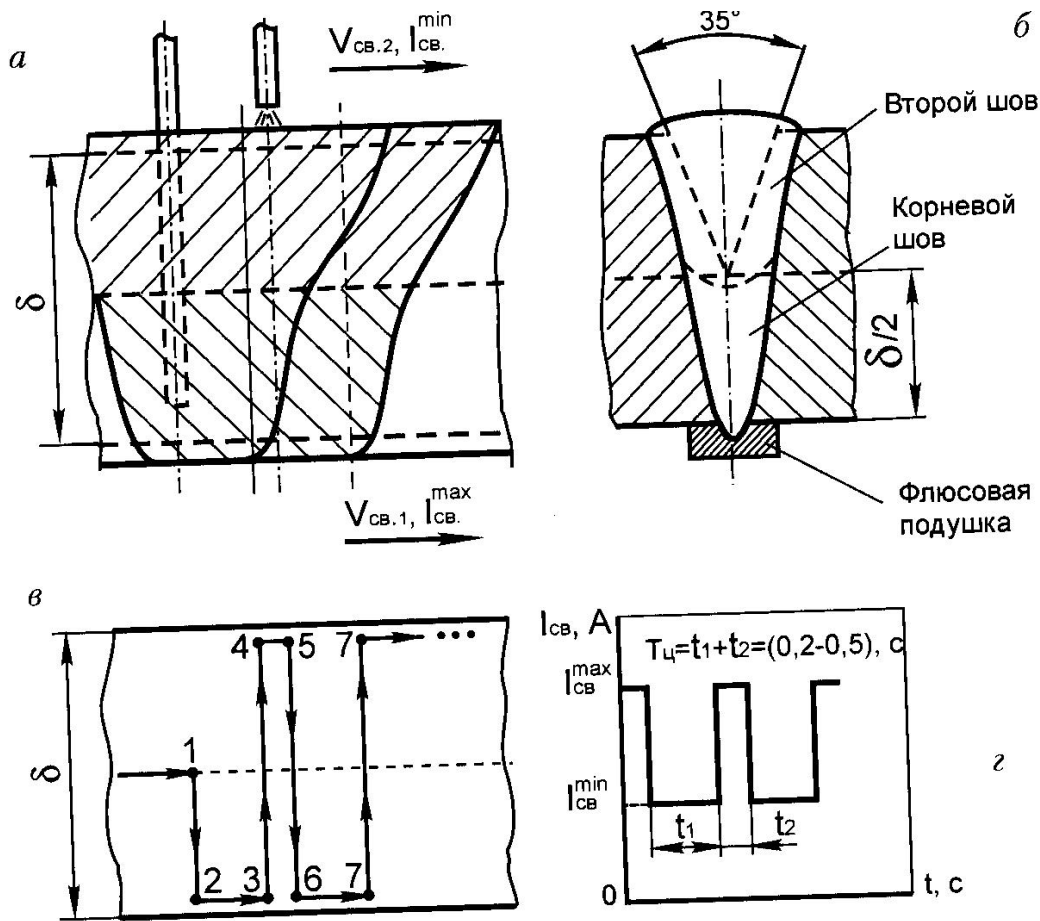


Рисунок 11 – Спосіб зварювання товстостінних виробів при регулюванні параметрів режиму

Серед розробок останніх років слід виділити зварювання пульсуючою дугою, багатодугове зварювання та зварювання закладним електродом.

2.2 Дугове зварювання неплавким електродом

Для зварювання в інертних газах застосовують електроди діаметром 0,5...10,0 мм з чистого вольфраму (ЭВЧ), вольфраму з присадкою двоокису торію (ЭВТ), оксиду лантану (ЭВЛ) та оксиду ітрію (ЭВИ). Коефіцієнт дифузії ітрію на два порядки вище, ніж торію та лантанодів. Завдяки цьому ітрію здатний тривалий час підтримувати необхідну концентрацію у зоні активної плями. Вольфрамові електроди з присадкою ітрію виявляються найбільш стійкими. Електроди з чистого вольфраму застосовують для зварювання на

змінному струмі алюмінію та його сплавів. Кінець електроду у цьому випадку оплавляється з утворенням на півсфери на торці. Торійовані та лантановані електроди застосовують зазвичай для зварювання на постійному струмі із заточкою електроду на кінці з висотою, що дорівнює 2...3 діаметри електроду. Гостре заточування електроду виключає блукання дуги поверхнею електроду.

Фірма „Фроніус-Факел” рекламує устаткування для дугового зварювання з присадним дротом, що підігривається (спосіб “TIG-Hotwire”). Відмінністю способу є використання окремих імпульсних джерел зварювального струму та струму підігріву. Джерело, що використовується для нагрівання дроту, забезпечує робочу напругу 1,5...5,0 В, що дозволяє виключити виникнення дуги на гарячому дроті. Синхронне подавання імпульсів як від зварювального джерела, так й від джерела нагріву сприяє підвищенню якості зварних швів, а також виконанню робіт у будь-яких просторових положеннях. TIG-Hotwire рекомендується для зварювання звичайної та високовуглецевої сталі, двофазних неіржавіючих сталей, алюмінієвих сплавів, а також зносостійкого наплавлення сталіту.

Застосування зовнішніх електромагнітних впливів (ЕМВ) є одним з ефективних способів підвищення та стабілізації показників якості швів при TIG-зварюванні. При цьому від напрямку, значення та часових характеристик індукції магнітного поля залежать характер і ефективність ЕМВ на дугу та метал зварювальної ванни.

2.3 Електродугове наплавлення

У виробничих умовах розроблені та реалізовані десятки різних способів відновлення деталей. Вибір найбільш прийняттого способу складається у технічному, економічному та організаційному аналізах вимог до відновлених деталей з урахуванням умов роботи їх у сполученнях, виробничої програми, оснащеності підприємств, забезпеченості матеріалами, енергією, робочою силою тощо. Технічні можливості різних способів відновлення та рекомендована область їх застосування наведені у *табл.24*.

Таблиця 24 – Способи відновлення деталей

Спосіб відновлення	Область застосування
1	2
Зварювання:	
ручне дугове	Зварка тріщин, обломів, приварювання накладок, вставок, заплат, наплавлення зносостійких матеріалів
автоматичне та механізоване дугове	Зварка тріщин, обломів, приварювання накладок, вставок, заплат, наплавлення зносостійких матеріалів
аргонодугове	Зварювання та наплавлення алюмінію та корозійностійкої сталі
газове	Зварювання тріщин, приварювання обломів, зварювання тонколистового матеріалу
контактне	Зварювання тонколистового матеріалу
тертям	Стикове зварювання деталей та їх елементів різної конфігурації при підвищених вимогах до якості зварного з'єднання
термітне	Зварювання великогабаритних та масивних деталей
електрошлакове	Приварювання обломів, зварювання великогабаритних деталей
електронно-променево	Зварювання відповідальних деталей з високою точністю
ультразвукове	Зварювання кольорових металів, сталі, негабаритних деталей
високочастотне	Зварювання корозійностійкої сталі
магнітно-імпульсне	Зварювання різнорідних матеріалів
вибухом	Зварювання різнорідних матеріалів
тиском	Зварювання деталей та їх елементів, різних за конфігурацією
дифузійне у вакуумі	Зварювання дрібних відповідальних деталей з високою точністю
ковальське	Зварювання невідповідальних деталей з невисокою точністю при підвищених вимогах до міцності зварного зедання
Наплавлення:	
дугове під флюсом	Наплавлення деталей діаметром понад 50 мм при підвищених вимогах до якості наплавленого матеріалу з товщиною наплавленого шару понад 1 мм
дугове у вуглекислому газі	Наплавлення сталених деталей діаметром понад 16 мм широкої номенклатури, що працюють у різних умовах
дугове з газополуменевим захистом	Наплавлення сталених та чавунних деталей, що працюють у різних умовах
вібродугове	Наплавлення сталених деталей, що працюють у різних умовах при невисоких вимогах до опору втомленості
дугове порошковим дротом або стрічкою	Наплавлення зносостійких шарів на деталях, що працюють в умовах інтенсивного абразивного зношування, ударних навантажень, у вузлах тертя
дугове в аргоні	Наплавлення алюмінієвих деталей і деталей з корозійностійкої сталі
контактне	Наплавлення гладких циліндричних зовнішніх та внутрішніх поверхонь із зношенням не більше 1 мм
газове	Наплавлення циліндричних та профільних поверхонь з місцевим зношенням при підвищених вимогах до зносостійкості
плазмове	Наплавлення відповідальних деталей при підвищених вимогах до зносостійкості та опору втомленості
багатоелектродне під флюсом лежачим електродом	Наплавлення деталей із значним зносом за величиною та площею
	Наплавлення плоских поверхонь та поверхонь складної конфігурації із значним зносом
електроімпульсне	Наплавлення зовнішніх циліндричних поверхонь із зносом до 0,5 мм з обмеженням температури нагрівання деталі
електроіскрове	Нарощування та зміцнення поверхонь із зносом до 0,02 мм при невисоких вимогах до суцільності покриття

1	2
електрошлакове	Наплавлення деталей із значними зносами, що перевищують 6 мм по товщині
рідким металом	Наплавлення деталей із значними зносами (не менше 3 мм) при підвищених вимогах до зносостійкості та знижених вимогах до ударних навантажень
з одночасним деформуванням	Наплавлення деталей переважно із зовнішнім шліцьовим профілем
з одночасним різанням	Наплавлення та обробка зносостійких матеріалів у нагрітому стані, обробка яких у холодному стані ускладнена
лазерне	Наплавлення зносостійких матеріалів на відповідальні деталі та деталі із складним профілем
високочастотне	Наплавлення зносостійких матеріалів на робочі органи та леза
високочастотне у вогнетривкому середовищі	Наплавлення проушин та цівок ланцюгів гусениць
<i>Нанесення газотермічних покриттів:</i>	
полуменеве порошковими матеріалами без оплавлення	Зовнішні та внутрішні циліндричні поверхні нерухомих сполук при невисоких вимогах до міцності зчеплення з основним матеріалом
полуменеве порошковими матеріалами з оплавленням	Зовнішні та внутрішні циліндричні та профільні поверхні при підвищених вимогах до зносостійкості та міцності зчеплення з основним матеріалом
плазмове порошкових матеріалів	Зовнішні та внутрішні циліндричні поверхні
плазмове дротом суцільного перерізу	Те саме
іонно-плазмове	Нанесення зносостійких та захисних покриттів з особливими властивостями товщиною до 0,02 мм
детонаційне	Нанесення зносостійких покриттів з особливими властивостями
дугове	Зовнішні та внутрішні циліндричні поверхні з невисокими вимогами до міцності зчеплення
високочастотне	Те саме
<i>Холодне пластичне деформування:</i>	
роздача	Відновлення зовнішніх поверхонь порожнистих деталей з нежорсткими вимогами до внутрішнього розміру
роздача з одночасним розтягуванням	Відновлення спеціальним деформувальним інструментом зовнішніх поверхонь та довжини порожнистих деталей з нежорсткими вимогами до внутрішнього розміру
витягування	Відновлення довжини деталей з нежорсткими вимогами до зовнішніх розмірів
розкочування	Закріплення додаткових ремонтних деталей в отворах (наприклад, згорнутих кілець), зміцнення
дорнування та калібрування	Відновлення поверхонь отворів після осадження або термічного впливу. Зміцнення та вигладжування
протягування	Те саме
осадження	Відновлення зовнішніх та внутрішніх поверхонь деталей при нежорстких вимогах до довжини
правка	Відновлення форми
накочування	Відновлення поверхні невідповідальних деталей, відновлення рифленої та шліцьової поверхонь
обтискання	Відновлення внутрішніх поверхонь деталей при нежорстких вимогах до зовнішніх
чеканка	Відновлення форми деталей, зміцнення зварних швів

1	2
<i>Гаряче пластичне деформування:</i> тиснення у закритому штампі	Відновлення форми та елементів деталей за рахунок перерозподілу металу з неробочих поверхонь на робочі для компенсації зносу
гідротермічне роздавання	Відновлення зовнішніх поверхонь порожнистих деталей з нежорсткими вимогами до внутрішнього розміру
термоцикловання	Відновлення, переважно внутрішніх поверхонь порожнистих деталей
термопластичне обтискання	Відновлення внутрішніх поверхонь порожнистих деталей
накочування	Відновлення зубчастих профілів шестерень та зірочок
ротаційне деформування	Відновлення зубчастих та шліцьових поверхонь
обтискання	Відновлення внутрішніх розмірів деталей при нежорстких вимогах до зовнішніх
правка	Відновлення форми
витягування	Відновлення довжини деталей з нежорсткими вимогами до зовнішніх розмірів
осадження	Відновлення зовнішніх та внутрішніх поверхонь деталей при нежорстких вимогах до довжини
роздача	Відновлення зовнішніх поверхонь порожнистих деталей з нежорсткими вимогами до внутрішнього розміру
видавлювання	Місцеве деформування з метою відновлення профілю та розмірів робочих поверхонь
відтяжка	Відновлення форми робочих поверхонь та різальних кромок робочих органів
термомеханічна обробка	Відновлення фізико-механічних характеристик. Зміцнення
<i>Гальванічні процеси:</i> залізнення: на постійному та асиметричному струмові, у спокійному та проточному електролітах; поза ванне	Відновлення зовнішніх та внутрішніх поверхонь деталей переважно із зносом до 0,2 – 0,5 мм, високою поверхневою твердістю та при нежорстких вимогах до міцності зчеплення покриття з основним металом
хромування: при постійному струмі, у спокійному або проточному електроліті	Відновлення зовнішніх та внутрішніх поверхонь деталей із зносом до 0,2 мм та високими вимогами по зносостійкості відновлених поверхонь
хімічне та електролітичне нікелювання	Відновлення зовнішніх та внутрішніх поверхонь деталей із зносом до 0,05 мм
цинкування	Захисне покриття від корозії
міднення	Відновлення зовнішніх та внутрішніх поверхонь деталей, виготовлених з міді та її сплавів
електролітичне натирання цинком та залізоцинковими сплавами	Відновлення зовнішніх та внутрішніх циліндричних поверхонь деталей при нежорстких вимогах до твердості поверхневого шару
нанесення гальвано-полімерних покриттів	Відновлення зовнішніх та внутрішніх циліндричних поверхонь деталей
кадмування	Захисні антикорозійні покриття
<i>Нанесення полімерних матеріалів:</i> напиленням: газоплуменевим, у електростатичному полі, у псевдозрідженому шарі, доцентровим намазуванням	Відновлення форми поверхонь облицювок та оперення, відновлення антифрикційних, електроізоляційних та декоративних покриттів. Відновлення посадкових поверхонь нерухомих сполук, зароблювання тріщин, пробойн

1	2
литвом: під тиском, опресовкою	Відновлення антифрикційних, електроізоляційних та декоративних покриттів, виготовлення деталей
намазуванням рідких прокладок, герметиків	Відновлення герметичності з'єднань
<i>Застосування ремонтних розмірів:</i>	
індивідуальних	Відновлення форми та посадок поверхонь обробкою більш дорогої деталі до зникнення слідів зносу та виготовленням, підгонкою менш дефіцитної та дорогої деталі за розмірами основної із забезпеченням заданої посадки
категорійних	Обробка деталі під заданий ремонтний розмір сполученої деталі з ремонтними стандартними розмірами
<i>Застосування додаткових деталей:</i>	
обрізання та приварювання елементів, що швидко зношуються	Відновлення робочих органів машин
бандажування	Відновлення зовнішніх поверхонь деталей із попередньою механічною обробкою та без неї
приварювання елементів та вкладишів	Відновлення розмірів профільних поверхонь
поставлення втулок та компенсаційних шайб	Відновлення отворів, розмірних кіл
поставлення звертуваних кілець із закріплювальним розкочуванням	Відновлення отворів
постановляння різьбових спіральних вставок	Відновлення різьбових з'єднань
постановляння фігурних вставок, стяжок та галенів	Усунення тріщин, відновлення герметичності
приварювання та приклеювання накладок, латок	Усунення тріщин, пробойн, відновлення герметичності
<i>Проведення хіміко-термічних процесів:</i>	
цементация та нітроцементация	Поверхнєве зміцнення
повторне азотування	Відновлення поверхонь деталей із зносом до 0,02 мм, поверхнєве зміцнення
дифузійне хромування у вакуумі та парогазове	Відновлення деталей із зносом до 0,05 мм, поверхнєве зміцнення
сульфохромування	Відновлення поверхонь деталей із зносом до 0,01 мм, поверхнєве зміцнення
дифузійне цинкування	Відновлення деталей із мідних сплавів із зносом до 0,8 мм
дифузійне борування	Поверхнєве зміцнення
<i>Електромеханічна обробка:</i>	
висаджування та вигладжування	Відновлення поверхонь нерухомих сполук із зносом до 0,2 мм
<i>Електрофізична обробка:</i>	
електроконтактна підводна, електроабразивна, анодно-механічна, електроерозійна	Обробка наплавлених поверхонь з високою твердістю, видалення залишків обламаних інструментів
<i>Електрохімічна обробка:</i>	
абразивним або металевим інструментом з примусовою подачею електроліту	Обробка наплавлених поверхонь з високою твердістю

1	2
Паяння: легко – та тугоплавкими припоями, пайко-зварювання	Відновлення герметичності з'єднань та трубопроводів, відновлення інструмента
Термічна обробка: відпуск, нормалізація, відпал, гартування, покращення	Відновлення фізико-механічних характеристик та структури матеріалу, зміцнення

У залежності від використовуваного джерела нагріву основні способи наплавлення та наварювання поділяють на три групи:

- термічні (електродугове, електрошлакове, плазмове, електронно-променеве, лазерне (світлове), індукційне, газове, пічне);
- термомеханічні (електроконтактне, прокатуванням, екструзією);
- механічні (вибухом, тертям).

Електродугове наплавлення є однією з найрозповсюдженіших технологій відновлення деталей зі зносом понад 0,6 мм (див. *табл. 25*).

Таблиця 25 – Порівняльні характеристики основних способів механізованого дугового наплавлення

Спосіб наплавлення	Продуктивність, кг/год	Частка основного металу в наплавленому, %	Товщина наплавленого металу, мм (один прохід)
Автоматичне під флюсом:			
одним електродним дротом	2 – 15	30 – 60	3,0 – 5,0
багатоелектродне	5 – 30	15 – 30	5,0 – 8,0
електродною стрічкою	5 – 30	10 – 20	2,5 – 5,0
Автоматичне та механізоване у захисному газі	2 – 8	30 – 60	3,0 – 5,0
Механізоване самозахисним порошковим дротом	2 – 9	25 – 50	2,5 – 5,0
Автоматичне самозахисним порошковим дротом:			
одним електродом	2 – 9	25 – 50	2,5 – 5,0
двома електродами	5 – 20	25 – 60	6,5 – 7,0
Автоматичне самозахисною порошковою стрічкою:			
одним електродом	10 – 20	15 – 40	2,5 – 5,0
двома електродами	20 – 40	10 – 60	6,0 – 8,0

Наплавлений метал. Для відновлення та зміцнення деталей застосовуються різноманітні наплавні матеріали, які здатні чинити опір різним видам зношення. З метою полегшення їх вибору наплавні матеріали класифікують за видом та загальною кількістю легуючих добавок.

Низьковуглецеві низьколеговані сталі використовують для відновлювального наплавлення різних роликів, коліс електромостових кранів, посадкових місць під підшипники, осей, валів та багатьох інших деталей, а також для створення підшару при наплавленні зносостійкими сплавами. Хімічний склад (у відсотках) наплавленого металу та його твердість після наплавлення наведено у *табл.26*.

Таблиця 26

№ з/п	Тип металу	C	Si	Mn	Cr	Твердість після наплавлення, <i>HV</i>
1	10Г2	0,10	–	2,0	–	230–260
2	11Г3	0,11	–	3,0	–	280–310
3	12Г4	0,12	–	4,0	–	320–360
4	15Г2ХС	0,15	1,2	1,7	0,7	220–270
5	30Х4Г	0,30	0,5	1,4	4,0	350–450

Наплавлення сталей цієї групи виконують ручним, механізованим, автоматичним під флюсом та у захисних газах способами. Метали № 1,2 та 3 наплавляють вручну електродами марок ОЗН-250У, ОЗН-300У та ОЗН-350У відповідно, автоматично стандартними зварювальними дротами марок Св-08ГА та Св-10Г2 під флюсом. Метали №4 та 5 наносять автоматично під флюсом дротами марок Нп-30ГСА, Нп-30Х5 відповідно або зварювальним дротом Св-08А під керамічним флюсом АНК-18 з попереднім підігрівом до 200...300°С з наступним повільним охолодженням. При наплавленні масивних деталей, незалежно від хімічного складу наплавлювального металу, потрібен попередній підігрів до зазначених температур. При наплавленні деталей з підвищеним вмістом вуглецю (понад 0,4%) та сірки (понад 0,03%) для запобігання кристалізаційних тріщин процес необхідно вести з мінімальним проплавленням основного металу для зменшення його доли у наплавленому. Оптимальну

структуру та твердість наплавленого металу цієї групи одержують при попередньому підігріві деталі до 200...250°C.

Високомарганцеві аустенітні сталі, що містять до 13%Mn, мають високу стійкість проти ударів та здатністю наклепуватися, в результаті чого твердість їх поверхні зростає до *HB* 450...500, при цьому серцевина залишається в'язкою. Цими сталями наплавляють деталі дробильно-розмольного устаткування, залізничні хрестовини та інші вироби, що працюють в умовах абразивного зносу з ударними навантаженнями. Хімічний склад (у відсотках) наплавленого металу та твердість наведені у *табл. 27*.

Таблиця 27

№ з/п	Тип металу	C	Si	Mn	Cr	Ni	Твердість <i>HB</i>	
							після наплавлення	після наклепу
6	Г13	1,0	0,6	13,0	–	–	220–280	450–500
7	Г13Н4	0,8	0,5	13,0	–	4,0	170–230	400–450
8	Г13Х25Н3	0,8	0,4	14,0	25	3,0	220–320	–

Метал №6 наплавляють під флюсом електродним дротом Нп—Г13А, №7 – самозахисним порошковим дротом ПП-АН105, №8 – вручну електродами ЦНИИН-4. Щоб реалізувати унікальні властивості сталей цієї групи – пластичність серцевини та високу твердість на робочій поверхні – необхідні отримання аустенітної структури та наступна дія на робочу поверхню ударів та тиску, що спричиняють пластичне деформування. У протилежному разі наплавлений метал не буде мати переваг перед низьковуглецевими сталями. Наплавлення високомарганцевих аустенітних сталей повинне супроводжуватися достатньо високою швидкістю охолодження в інтервалі температур 800...500°C з метою фіксації аустенітної структури. Повільне охолодження наплавленого металу призводить до розпаду аустеніту та виділення карбідів по границях зерен. При цьому наплавлений метал виходить крихким та схильним до утворення тріщин. У зв'язку з розпадом аустеніту при нагріванні сталі цієї групи не призначені для роботи при високих температурах.

Хромисті сталі, що мають високу стійкість проти корозії та міцність при підвищених температурах, застосовуються для наплавлення ущільнюючих поверхонь засувок для пару та води, плунжерів гідропресів та інших деталей. У *табл.28* наведено середній хімічний склад (у відсотках) наплавленого металу та твердість після наплавлення.

Таблиця 28

№ з/п	Тип металу	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	Ti	Твердість, HRC
9	1X13	0,10	1,0	0,4	13,0	–	–	–	–	34 – 40
10	3X13	0,25	0,4	0,4	13,0	–	–	–	–	45 – 52
11	1X17Г	0,12	0,4	0,4	17,0	–	–	–	0,2	37 – 44
12	120X12М	1,20	0,3	0,3	12,0	0,7	–	–	–	38 – 45
13	200X12ВФ	2,00	0,3	0,4	12,5	–	1,2	0,2	–	40 – 48

Метал №9 наплавляють самозахисним порошковим дротом ПП-АН106, №10 – стандартними наплавними дротами Нп-30X13 та Нп-40X13, №11 – зварювальним дротом Св-10X17Г. Метали №12 та 13 наплавляють порошковими дротами ПП-АН103 та ПП-АН104. Для попередження утворення пор наплавлення хромистих сталей виконують на найкоротшій дузі при напрузі 24...26 В. Наплавлений метал схильний до утворення тріщин, тому наплавлення ведуть з попереднім та супутнім підігрівом деталі до 150...250°C. Особливі складнощі виникають при наплавленні металів №12 та 13 через підвищену схильність до утворення гарячих та холодних тріщин. Виникнення холодних тріщин удається попередити попереднім підігрівом деталі до 500°C з наступним уповільненим охолодженням. Кристалізаційні тріщини найчастіше виникають при наплавленні на низьковуглецеву сталь у результаті дифузії вуглецю з наплавленого металу в основний. Для попередження тріщин наплавлення необхідно вести з мінімальною глибиною проплавлення основного металу, що краще всього досягається при індукційному наплавленні з рідким присадним металом.

Хромовольфрамкові та хромомолібденові сталі, що мають високу стійкість до термічної втомленості та зношенню, використовуються для наплавлення валків гарячої прокатки, штампів гарячого штампування та ін.

деталей. Середній хімічний склад (у відсотках) наплавленого металу та твердість наведено в *табл. 29*.

Таблиця 29

№ з/п	Тип металу	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	Твердість <i>HRC</i> при температурі, °C	
									20	600
									14	25X5ФМС
15	3X2В8	0,32	0,6	0,8	2,5	8,5	–	0,3	44–50	34–40
16	3X3В3М3Ф	0,30	1,0	0,7	3,2	2,5	2,4	0,7	44–48	33–36
17	5X4В3Ф	0,50	0,5	0,8	4,0	3,5	–	0,4	40–44	–
18	110X14В12Ф2	1,20	0,5	0,7	14,5	13,0	–	1,7	40–55	–

Метали №14, 15 та 16 наплавляють порошковими дротами ПП-25X5ФМС, ПП-3X2В8 та ПП-АН132 відповідно, №17 – спеченою стрічкою ЛС-5X4В3ФС та №18 – покритими електродами ВСН-6. Для попередження тріщин наплавлення ведуть при температурі деталі 350...400°C з наступним уповільненим охолодженням.

Масивні деталі необхідно відпускати при температурі 450...550°C та уповільнено охолоджувати разом з піччю. Для наплавлення внутрішніх поверхонь застосовують самозахисні порошкові дроти, наприклад марки ПП-АН130. У цьому випадку слід використовувати джерело живлення з жорсткою зовнішньою характеристикою.

Високохромисті чавуни застосовують для наплавлення деталей, що працюють в умовах абразивного, гідро - та газоабразивного зносу при звичайних та високих температурах. Наприклад, деталі засипних апаратів доменних печей. Броньові плити лотків, валки коксових дробарок, ножі бульдозерів, зуби ковшів екскаваторів тощо. Хімічний склад (у відсотках) наплавленого металу та твердість наведено у *табл.30*.

Метали №19, 20, 22 та 23 наплавляють порошками зі сплавів або сумішами порошків газополуменим та плазмовим способами, а також дуговим – невитратними електродами, метал № 21 – покритими електродами дуговим способом. Для наплавлення металу № 20 застосовують порошкові дріт ПП-АН101 та стрічку ПЛ-АН101. Наплавлений метал цієї групи має високу схильність до

утворення холодних тріщин, попередити які майже неможливо. Навіть попередній підігрів до 600°C і уповільнене охолодження не виключають виникнення тріщин. Тому зміцнені деталі експлуатують з тріщинами у наплавленому шарі, які не спричиняють суттєвого впливу на зносостійкість. Головна умова високої зносостійкості – відсутність тріщин вздовж потоку абразивних часток.

Таблиця 30.

№ з/п	Тип металу	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo	V	B	Твердість HRC
19	250X30CP	2,4	2,0	1,0	26,0	–	–	–	–	17	54–58
20	300X28H4C4	3,0	3,5	1,8	28,0	4,0	–	–	–	–	48–54
21	320X23C2ГТР	3,2	2,3	1,3	23,0	–	–	–	1,0	1,0	55–62
22	400X28H2C2BM	3,9	1,0	1,0	27,0	1,8	0,3	0,1	–	–	52–56
23	500X38CGH	4,9	2,1	2,0	38,0	1,4	–	–	–	–	55–60

Практика показала, що для зменшення утворення тріщин наплавлення високохромистими чавунами доцільно виконувати на метал з максимально низькою межею текучості. З цією метою часто використовують підшари, наплавлені зварювальним дротом Св-08А. Для збереження високої зносостійкості при наплавленні високохромистих чавунів необхідно забезпечувати мінімальну частку основного металу в наплавленому, бо розчинення наплавленого металу основним різко знижує його зносостійкість.

Наплавні матеріали. *Дроти суцільного перерізу.* Передбачено випуск сталюого наплавного дроту (Нп) діаметром 0,3–6,0 мм (використовують переважно діаметром 2,0–4,0 мм), а також катанки діаметром 6,5–8,0 мм. Хімічний склад, твердість наплавленого металу та призначення наплавних дротів, що використовуються для відновлення та зміцнення деталей металургійного устаткування, наведені у *табл. 31*. Для відновного наплавлення та наплавлення проміжних шарів використовуються також декілька марок сталюого зварного дроту (Св) суцільного перерізу. Усі ці дроти призначені для наплавлення під флюсом або у середовищі захисних газів.

Порошкові дроти. За допомогою порошкового дроту, який складається з оболонки (м'якої сталеві, нікелевої або подібної стрічки) та осердя з порошків

легуючих компонентів (феросплавів, чистих металів, карбідів, борідів тощо). Досить легко забезпечується отримання високолегованих електродних матеріалів. У самозахисних порошкових дротах, при використанні яких не потрібні флюс або захисний газ, до шихти осердя додають газо- та шлакоутворювальні компоненти, розкислювачі та елементи, що мають велику хімічну спорідненість до азоту.

Найчастіше використовують порошкові дроти діаметром 3,6 мм для наплавлення під флюсом та 2,0–3,0 мм для наплавлення відкритою дугою. Для наплавлення під флюсом великогабаритних деталей застосовують дріт діаметром 5,0–6,0 мм. У *табл. 32* наведено хімічний склад наплавленого металу та призначення порошкових дротів, розроблених у ІЕЗ ім. Є.О.Патона для наплавлення деталей металургійного устаткування.

Холоднокатані, порошкові та спечені стрічки. Наплавлення електродною стрічкою характеризується високою продуктивністю процесу, малим проплавленням основного металу, великою шириною наплавленого валика. Разом з тим, цей процес недоцільний для відновлення малогабаритних деталей та тих, що мають складну поверхню. В *табл. 33* наведено хімічний склад стрічок для електродугового наплавлення та зазначені типові об'єкти їх використання.

Сталеву холоднокатану стрічку для наплавлення під флюсом виготовляють зі стандартних сталей – конструкційних, інструментальних та пружинних. Як правило, товщина стрічки становить 0,4–1,0 мм, ширина 20–100 мм.

Флюси. Для наплавлення застосовують плавлені та керамічні флюси. Плавлені флюси легують метал несуттєво, їх використовують у поєднанні з легованим електродним дротом (стрічкою). Як і при зварюванні, якість наплавленого шару у багатьох випадках визначається правильним вибором типу та складу флюсу. Хімічний склад найчастіше вживаних при наплавленні плавлених флюсів наведено у *табл. 34*.

Високоактивні флюси АН-348А та АН-60 із великим вмістом SiO_2 та MnO використовують для наплавлення низьковуглецевих та низьколегованих сталей. Ці флюси забезпечують хороше формування наплавленого валика, малу схильність до утворення пор та хорошу здатність шлакової кірки відділятися.

Пемзоподібний флюс АН-60 рекомендується також для наплавлення електродною стрічкою та багатоелектродного наплавлення.

Активний безмарганцевий флюс АН-26 використовують в основному для наплавлення аустенітних хромонікелевих сталей, а також інших легованих та високолегованих сталей. Перевага цього флюсу – відмінне формування наплавленого валика та дуже мала схильність до пор.

Найпоширенішим при наплавленні низько - та середньолегованих сталей є низькокремнистий флюс АН-20. Він забезпечує досить задовільне формування наплавлювальної поверхні та легку відділимість шлакової кірки з поверхні як холодного, так і нагрітого до 300...400 °С металу.

Пемзоподібний низькокремнистий флюс АН-70 більш тугоплавкий, ніж АН-20, забезпечує можливість наплавлення циліндричних поверхонь відносно малих діаметрів.

Нейтральні безмарганцеві флюси марок АН-15, АН-28, ОФ-10 застосовують для наплавлення середньо- та високолегованих сталей та сплавів. Ці флюси характеризуються малою окислювальною здатністю, забезпечують хороше формування наплавленого валика. Недоліком цих флюсів є погана відділимість шлакової корки з поверхні швів, які містять ванадій та ніобій. Вони також мають підвищену гігроскопічність, що вимагає обов'язкового високотемпературного прожарювання перед використанням.

Фторидні флюси АН-72 та АН-90 використовують при електродуговому та електрошлаковому наплавленні легованих та високолегованих сталей та сплавів. До позитивних якостей цих флюсів слід віднести відмінну відділимість шлакової корки, хороші формувальні та рафінувальні властивості.

Таблиця 31 – Сталеві наплавлювальні (Нп) та зварювальні (Св) дроти суцільного перерізу, що використовуються для наплавлення деталей металургійного устаткування

Марка	Масова частка, %						Твердість після наплавлення	Типові об'єкти наплавлення
	С	Mn	Si	Cr	Ni	Інші		
Нп-30	0,27–0,35	0,5–0,8	0,2–0,4	≤0,25	≤0,3	–	160–220НВ	Осі, вали, шпинделі
Нп-45	0,42–0,50	0,5–0,8	0,2–0,4	≤0,25	≤0,3	–	160–220НВ	Те саме
Нп-50	0,45–0,55	0,5–0,8	0,2–0,4	≤0,25	≤0,3	–	180–240НВ	Опорні ролики, вали, осі
Нп-65	0,60–0,70	0,5–0,8	0,2–0,4	≤0,25	≤0,3	–	220–300НВ	Те саме
Нп-40Г	0,35–0,45	0,7–1,0	0,2–0,4	≤0,30	≤0,3	–	180–240НВ	Осі, вали, шпинделі
Нп-65Г	0,60–0,70	0,9–1,2	0,2–0,4	≤0,30	≤0,3	–	230–310НВ	Опорні ролики, кранові колеса, вали
Нп-30ХГСА	0,27–0,35	0,8–1,1	0,9–1,2	0,8–1,1	≤0,4	–	220–300НВ	Обтискні прокатні валки, кранові колеса
Нп-50Х6ФМС	0,45–0,55	0,3–0,6	0,8–1,2	5,5–6,5	≤0,4	0,4-0,6V, 1,2-1,6Mo	42–48 HRC _e	Штампи, валки сортопрокатних та обтискних станів
Нп-40Х13	0,35–0,45	≤0,8	≤0,8	12,0–14,0	≤0,6		45–52 HRC _e	Різні ножі, штампи
Нп-30Х10Г10Т	0,27–0,35	10,0–12,0	≤0,4	10,0–12,0	≤0,6		200–220НВ	Кранові колеса, плунжери гідропресів
Нп-45Х4В3Ф	0,40–0,50	0,8–1,2	0,7–1,0	3,6–4,6	≤0,6	2,5-3,0W, 0,2-0,4V	38–45 HRC _e	Штампи, валки сорто- та листопрокатних станів
Нп-45В8Х2Ф	0,40–0,50	1,0–1,4	0,4–0,7	2,2–3,0	≤0,6	8,0-9,5W, 0,3-0,5V	40–46 HRC _e	Штампи, валки сорто- та листопрокатних станів, ножі
Нп-60В10Х3Ф	0,55–0,65	1,3–1,8	0,4–0,7	2,6–3,6	≤0,4	9,0- 10,5W, 0,2-0,4V	42–50 HRC _e	Штампи, валки сорто- та листопрокатних станів
Св-08	≤0,10	0,35–0,60	≤0,03	≤0,15	≤0,3	–	120–160НВ	Осі, вали, підшар
Св-08Г2С	0,05–0,11	1,80–2,10	0,70–0,95	≤0,20	≤0,25	–	180–210НВ	Те саме
Св-18ХГС	0,15–0,22	0,80–1,10	0,90–1,20	0,8–1,1	≤0,3	–	240–300НВ	Осі, вали

Таблиця 32 – Порошкові наплавні дроти для наплавлення деталей металургійного устаткування

Марка дроту (флюсу)	масова частка елементів у наплавленому металі, %							твердість на плавки	типові об'єкти наплавлення
	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	інші		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ПП-Нп-200Х12М (АН-15М, АН-20)	1,9	0,3	0,3	12,0	0,55	–	–	40-46 HRC _e (60-62 HRC _e після т/о)	ножі холодного різання, керни кліщових кранів
ПП-Нп-200Х12ВФ (АН-15М, АН-20)	2,0	0,3	0,4	12,0	–	0,25	1,2W	40-46 HRC _e (60-62 HRC _e після т/о)	те саме
ПП-Нп-200Х15С1ГРТ самозахисна	2,0	1,0	1,5	15,0	–	–	0,7В, 0,6Ті	50-56 HRC _e	молотки роторних та валки коксових дробарок
ПП-Нп-250Х10В8С2Т самозахисна	2,5	–	2,0	10,0	–	–	8,0Nb, 1,0Ті	50-58 HRC _e	те саме
ПП-На-300Х22МР2Т самозахисна	3,0	1,0	1,0	22,0	0,8	–	1,8В, 0,6Ті	56-63 HRC _e	те саме
ПП-Нп-18Х1Г1М (АН-348А, АН-60)	0,18	1,4	0,8	1,4	0,4	–	–	320-380НВ	кранові колеса, ролики рольгангів
ПП-Нп-12Х14Н3 самозахисна	0,12	0,6	0,8	14,0	–	–	3,0Ni	42-48 HRC _e	плунжери гідропресів
ПП-Нп-15Х13 (АН-26П, АН-26СП)	0,15	0,6	0,8	13,0	–	–	–	38-48 HRC _e	ролики МНЛЗ (горизонтальних ділянок)
ПП-Нп-12Х13Н2МФА (АН- 26П, АН-26СП)	0,12	0,8	0,6	13,0	0,8	0,2	1,6Ni, 0,06N	38-52 HRC _e	ролики МНЛЗ (криволінійних ділянок)
ПП-Нп-50Х6СГРТ самозахисна	0,5	0,5	1,2	8,0	–	–	0,7В, 0,2Ті	57-62 HRC _e	обрізні та вирубні штампи

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ПП-Нп-80X12K4Ф3B2M2HP	0,8	–	–	12,0	2,0	3,0	4,0Co; 2,0W; 1,0Ni; 0,1B	57-60 HRC _e	те саме
ПП-Нп-25X5ФМС (АН-15)	0,25	0,6	1,0	5,0	1,1	0,4	–	40-46 HRC _e (47-50 HRC _e після т/о)	валки гарячої прокатки, ножі та штампи гарячого штампування
ПП-Нп-30X4B2M2ФС (АН- 20)	0,30	0,8	0,9	4,0	2,2	0,5	2,5W	47-51 HRC _e	те саме
ПП-Нп-35B9X3СФ (АН-20)	0,35	0,9	0,8	3,0	–	0,3	9,0W	44-50 HRC _e	те саме
ПП-Нп-30X2M2ФН (АН-20)	0,3	0,8	1,0	2,5	2,4	0,5	1,0Ni	42-48 HRC _e	те саме
ПП-Нп-Н12X3M2Д самозахисна (АН-20)	≤0,1	0,5	0,5	3,0	2,0	–	12,0Ni, 1,0Cu	32-35 HRC _e (48-52 HRC _e після старіння)	те саме
ПП-Нп-45B9X3СФ (АН-20)	0,45	0,9	0,8	3,0	–	0,3	9,0W	44-50 HRC _e	те саме
ПП-Нп-90Г13Н4 самозахисна	0,8	13,0	0,2	–	–	–	4,0Ni	160-240HB	хрестовини стрілочних переводів, литво зі сталі Г13Л
ПП-Нп-14СТ самозахисна	0,14	0,5	0,6	–	–	–	0,4Ti	240-260HB	робочі колеса кранів, осі, вали
ПП-Нп-19СТ самозахисна	0,19	0,5	0,6	0,4	–	–	0,6Ti	300-310HB	те саме

Таблиця 33 – Стрічки для електродугового наплавлення деталей металургійного устаткування

Марка стрічки (флюсу)	Масова доля, %								Твердість наплавки	Типові об'єкти наплавлення
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Ti	Mo	Інші		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>Сталеві холоднокатані</i>										
50Г (АН-60)	0,5	1,0	0,3	0,3	0,3	–	–	–	230 – 280 НВ	Опорні ролики, кранові колеса, вали
65Г (АН-60)	0,65	1,0	0,3	0,3	0,3	–	–	–	230–310 НВ	Те саме
50ХФА (АН-60)	0,5	1,0	0,3	1,0	0,4	–	–	0,2V	52-56 HRC _e	Ножі та штампи гарячого штампування
25Х5ФМС (АН-60)	0,25	1,0	1,0	5,0	–	–	–	0,5V	40-46 HRC _e	Валки гарячої прокатки, ножі та штампи гарячого штампування
<i>Порошкові</i>										
ПЛ-Нп-40Х2Н6Г2С2М2ФБ (АН-60)	0,4	2,0	2,0	2,0	6,0	–	2,0	1,0Nb, 1,0V	50–56 HRC _e	Ножі гарячого різання
ПЛ-Нп-120Х22Р3Г2С самозахисна	1,2	2,0	1,0	22,0	–	1,0	–	3,0В	54–60 HRC _e	Молотки дробарок, конуси та чаші доменних печей
ПЛ-Нп-300Х25С3Г2Н2 (АН-60)	3,0	2,0	3,0	25,0	2,0	–	–	–	50–54 HRC _e	Те саме
ПЛ-Нп-400Х25С3Г2МН самозахисна	4,0	2,0	3,0	25,0	1,0	–	1,0	–	50–58 HRC _e	Молотки дробарок
ПЛ-Нп-400Х20Б7М7Н5В2Ф самозахисна	4,5	–	–	20,0	5,0	–	7,0	2,0W, 1,0V, 7,0Nb	54–60 HRC _e	Конуси та чаші доменних печей
ПЛ-Нп-500Х40Н40С2РЦ самозахисна	5,0	1,0	2,0	40,0	40,0	–	–	0,2В	50–56 HRC _e	Те саме

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>Спечені</i>										
ЛС-50Х4ВЗФС (АН-60)	0,7	0,4	0,5	5,0	–	–	–	4,0W, 0,7V	42–46 HRC _e	Валки гарячої прокатки, ножі гарячого різання, штампи гарячого штампування
ЛС-45Х4ВЗФС (АН-26П)	0,6	0,5	0,9	4,2	–	–	–	0,6W, 0,6V	42–46 HRC _e	Те саме
ЛС-25Х5ФМС (АН-60)	0,4	0,4	0,7	6,2	–	–	1,5	0,8V	38–44 HRC _e	Те саме
ЛС-18ХГСА (АН-60)	0,3	0,7	0,9	1,1	–	–	–	–	24-32 HRC _e	Обтискні валки прокатних станів, кранові колеса
ЛС-12Х13Н2МФА (АН-26П)	0,12	0,8	0,6	13,0	1,6	–	0,8	0,1N, 0,2V	38–52 HRC _e	Роли МНЛЗ

Таблиця 34 – Хімічний склад плавлених флюсів для наплавлення

марка флюсу	масова частка, %								
	SiO ₂	MnO	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	CaF ₂	FeO	K ₂ O+Na ₂ O	інші
АН-348А	42,0	36,0	≤6,5	6,0	≤4,5	4,5	≤2,0	–	–
АН-60	42,0	38,0	6,0	2,0	≤5,0	6,0	≤1,5	–	–
АН-26	30,0	3,0	6,0	17,0	21,0	22,0	≤1,5	–	–
АН-20	20,0	≤0,5	7,0	11,0	30,0	29,0	≤1,0	2,5	–
АН-15М	10,0	≤1,0	30,0	≤2,0	35,0	18,0	≤1,0	–	4,0NaF
АН-28	8,0	≤1,0	38,0	≤2,0	38,0	10,0	≤2,0	1,5	–
АН-70	7,0	–	30,0	–	30,0	30,0	1,0	2,0	–
АН-72	8,0	≤1,0	30,0	–	20,0	30,0	≤2,0	–	10,0ZrO ₂
ОФ-6	≤4,0	≤0,3	20,0	3,0	22,0	52,0	1,5	–	–
ОФ-10	11,0	–	≤8,0	12,0	30,0	40,0	≤1,0	–	–

Керамічні флюси відносяться до числа неплавлених. Їх виготовляють із суміші порошкоподібних матеріалів, скріплених за допомогою клейких речовин, головним чином рідкого скла. Сучасні керамічні флюси для наплавлення створені на магнезійно-алюмінатній основі й забезпечують отримання наплавленого металу будь-якої необхідної твердості. В основному це досягається шляхом його легування хромом та вуглецем через флюс. Середній хімічний склад металу, наплавленого зварювальним дротом Св-08, та отримувана при цьому твердість наведені у *табл.35*.

Варто підкреслити, що у випадку використання керамічного флюсу необхідно суворо дотримуватися оптимального діапазону режимів наплавлення, інакше невідворотним буде значне відхилення складу наплавленого металу від заданого.

Таблиця 35 – Хімічний склад та твердість металу, наплавленого дротом Св-08 під різними керамічними флюсами

марка флюсу	масова частка, %							твердість, HRC _e
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Cu	
ЖСН-1	0,5	0,6	2,0	5,4	–	–	–	45-50
ЖСН-2	0,3	0,3	1,2	2,8	–	–	–	33-38
ЖСН-4	1,1	0,6	0,6	5,0	–	–	–	40-43
ЖСН-5	0,2	0,3	0,3	6,2	0,7	0,3	–	35-38
ЖСН-6	0,3	0,6	3,8	5,5	0,7	0,6	1,5	40-43
АНК-18	0,3	0,2	1,4	3,5	–	–	–	35-40
АНК-19	0,6	0,3	0,8	4,5	–	–	–	50-55
АНК-40	0,2	0,8	1,2	1,2	–	–	–	25-30

Контрольні питання до теми 2

1. Які зміни у вимогах до якості зварювальних дротів передбачаються гармонізованим стандартом ДСТУ ISO 14341:2004?
2. Наведіть перелік напрямків удосконалення електродних дротів.
3. Які технологічні прийоми є найважливішими з огляду на якість випуску катанки?
4. Сформулюйте суть способів покращення стану поверхні електродних дротів.
5. Які світові тенденції вдосконалення технологій виробництва порошкових дротів?
6. Наведіть приклади вдосконалення газового захисту зони дугового зварювання.
7. На чому ґрунтуються класифікація флюсів та принципи їх диференційованого використання?
8. Чим зумовлена перспективність агломерованих флюсів?
9. Охарактеризуйте роботу сучасних джерел живлення зварювальної дуги, передовсім інверторів та чопперів.
10. У чому проявляється перевага способу ВКЗ?
11. Чим відрізняється STT-спосіб від звичайного MAG-зварювання?
12. У чому суть переваги імпульсного подавання електродного дроту?
13. За якими напрямками виконують вдосконалення зварювання під флюсом?
14. Які резерви у TIG-зварювання? Як вони використовуються?
15. За якими критеріями виконують вибір доцільного способу електродугового наплавлення?
16. У яких випадках відновлення/зміцнення доречно наносити низьковуглецеву низьколеговану сталь? Високомарганцевисту аустенітну сталь? Хромисті сталі? Високохромистий чавун? Хромистовольфраміву або хромистомолібденову сталі?
17. Охарактеризуйте області доцільного застосування різних наплавних матеріалів (дроти – суцільні та порошкові, флюси)

3 Високотехнологічні процеси

3.1 Плазмові технології

Плазмові джерела забезпечують густину потужності $10^4 \dots 10^5$ Вт/см², тобто менше, ніж електронний та лазерний промені, проте їх одинична потужність може сягати 160 кВт та більше, а ефективний ККД нагріву – 0,72.

У промисловій практиці знаходять застосування головним чином дугові плазмотрони постійного струму. Найпоширенішими є способи отримання плазмових струменів шляхом інтенсивного охолодження газовим потоком стовпа дуги, що горить у вузькому водоохолоджуваному каналі плазмотрона.

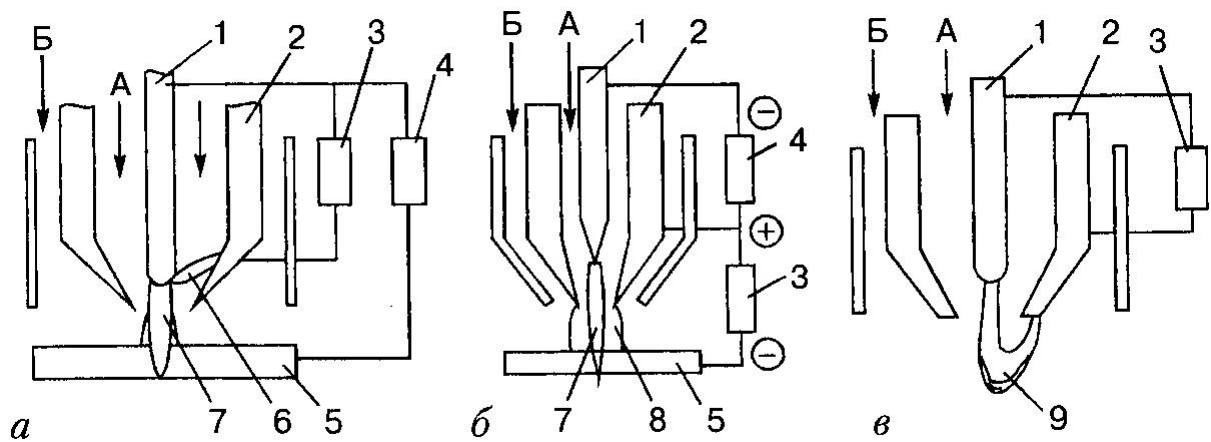
В інженерній практиці застосовують плазмотрони, виконані за двома схемами:

1. Плазмотрони для обробки плазмовою дугою (прямої дії), в яких одним з електродів є оброблюваний матеріал (зварювання, різання). У цьому випадку використовують два енергетичних джерела: плазмовий струмінь та електрично активна пляма дуги. Внутрішній ККД такого плазмотрона складає 60...80%.

2. Плазмотрони для обробки плазмовим струменем непрямої дії, в яких дуга горить між електродом та соплом. Для зниження теплового навантаження на електрод та сопло застосовують магнітне або вихрове закручування дуги; максимальний ККД таких плазмотронів ~50...70%.

Плазмове зварювання принципово відрізняється від дугового тим, що на формування ванни та шва суттєвий вплив чинить плазмово-газовий потік. Для підвищення продуктивності та якості плазмового зварювання запропоновано способи, які передбачають використання декількох джерел нагріву. До таких відноситься плазма-MIG-зварювання, запропоноване фірмою „Філіпс”, та плазмове зварювання біполярною дугою, запропоноване в ІЕЗ ім. Є.О.Патона. В останньому випадку зварювання можна виконувати біполярною дугою здвоєного плазмотрону або плазмотроном та дуговим пальником, розташованими по обидва боки від поверхні зварюваного виробу.

Найбільш поширеним є спосіб зварювання плазмовою дугою, при якому дуговий розряд збуджується між неплавким електродом плазмотрону та зварюваним виробом (рис.12,а).



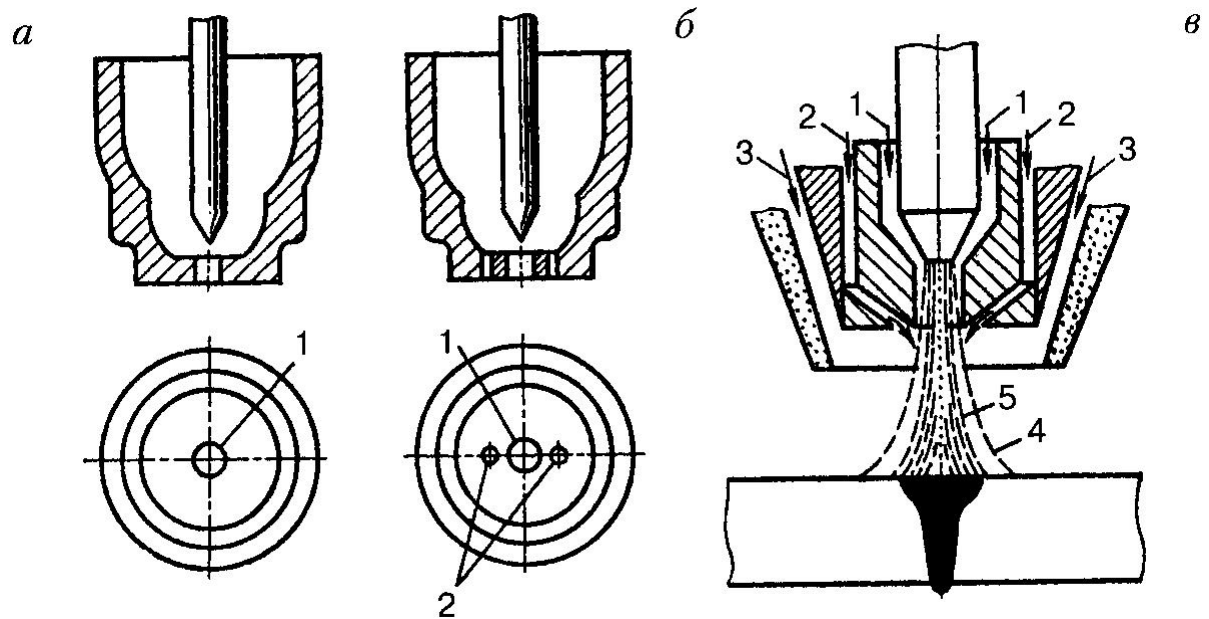
1 – електрод; 2 – сопло; 3,4 – джерело допоміжної та основної дуги; 5 – плазмова дуга; 6 – допоміжна дуга; 7 – виріб; 8 – дуга зворотної полярності; 9 – стовп дуги та факел.

Рисунок 12 – Схема плазмового зварювання: дугою прямої дії (а); мікро плазмового на зворотній полярності (б); непрямої дії (в)

У порівнянні з аргонодуговим плазмове зварювання відрізняється стабільним горінням дуги, більш рівномірним проплавленням кромки. Завдяки циліндричній формі стовпа дуги плазмове зварювання менш чутливе до зміни довжини дуги. Зміна довжини дуги конічної форми (при аргонодуговому зварюванні) завжди веде до зміни плями нагріву та, як наслідок, до зміни ширини шва. Плазмова дуга дозволяє зберігати практично незмінним діаметр плями, а також стабілізувати проплавлення основного металу. Ця властивість плазмової дуги успішно використовують при зварюванні тонких листів.

Плямі нагріву при зварюванні плазмовою дугою може бути надано найсприятливішої форми. Зміни форми плями нагріву отримують. Застосовуючи спеціальні сопла (рис.13). Якщо потрібно мати пляму нагріву витягнутої форми, то в соплі виконують два додаткових отвори. Через ці отвори надходить холодний газ, що спричиняє зменшення поперечного розміру плями нагріву та надає їй витягнутої форми. При зварюванні з таким

соплом зона термічного впливу звужується, а швидкість зварювання зростає на 50...100%.



а – з круглою плямою нагріву; *б* – з витягнутою плямою нагріву (1 – центральний канал для газу, що забезпечує утворення плазмової дуги; 2 – бокові отвори для проходження холодного фокусуєчого газу); *в* – з додатковим газовим потоком для фокусування дуги (1 – плазмоутворювальних газ; 2 – фокусуєчий газ; 3 – захисний газ; 4 – обрис дуги при відсутності фокусуєчого газу; 5 – те ж, з фокусуєчим газом)

Рисунок 13 – Схеми плазмоутворювальних сопел для зварювання плазмовою дугою

Різновид сопла з додатковим отвором для створення фокусуєчого газового потоку показано на *рис.13,в*. Плазмоутворювальний газ 1 подається тангенційно, що дозволяє за невеликої його витрати добре стабілізувати дугу. Потік фокусуєчого газу, направлений під кутом до осі стовпа дуги, додатково стискає її. Деформувати пляму нагріву при зварюванні можливо, накладаючи на неї неоднорідне магнітне поле, яке створюють дві пари магнітних полюсів. Дуга, що знаходиться у середині такої магнітної системи, витягується в одному напрямку, перетворюючись на лінійне джерело нагріву. При плазмовому зварюванні отримують глибоке проплавлення основного металу у формі „замкової шпарини”.

При зварюванні на форсованому режимі для якісного формування шва необхідно забезпечити рух розплавленого металу не в глибину порожнини кратера, а паралельно поверхні зварюваних пластин, його боковою поверхнею. Зі збільшенням швидкості зварювання та підвищенням газо кінетичної енергії плазмового потоку ця умова може порушуватися, що спричиняє грубо лускувату форму шва, подрізи, нерівномірну глибину проплавлення, періодичний ланцюг пор, викид розплавленого металу. Для зменшення динамічного напору плазмово-газового потоку запропоновано подавати стискаючий газ у канал сопла у зворотному (від виробу) напрямку (рис.14).

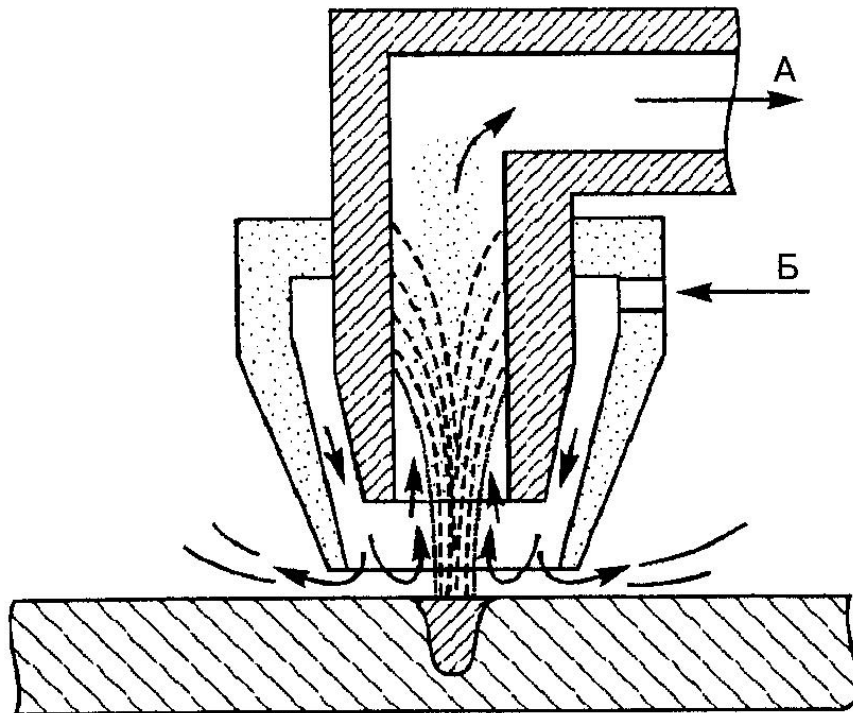
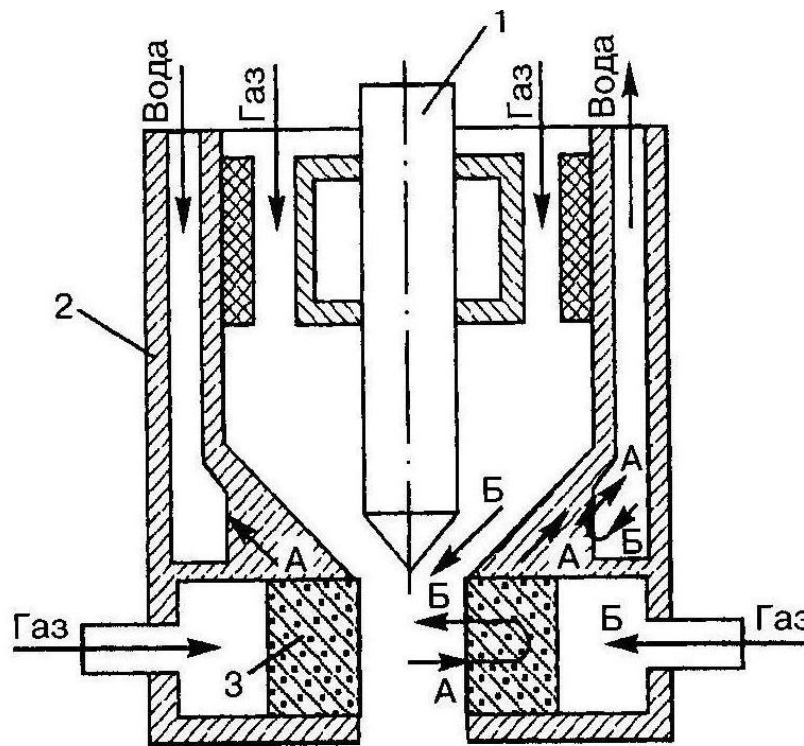


Рисунок 14 – Схема плазматрону зі зворотним потоком плазмоутворювального газу

З тією ж метою було розроблено плазматрон із системою подачі стискаючого газу в радіальному напрямку, через стінку каналу з пористого газопроникного матеріалу (рис.15).



1 – вольфрамовий електрод; 2 – сопло; 3 – вставка з пористого вольфрамо-мідного сплаву

Рисунок 15 – Схема плазмотрону з пористим соплом та радіальною подачею „стискаючого” газу

Витрату плазмоутворювального газу встановлюють таким чином, щоб витікання плазми з сопла не було турбулентним, а силовий вплив плазмово-газового струменя на поверхню ванни не призводив до розбризування металу та порушення формування шва.

В якості плазмоутворювального газу звичайно застосовують аргон або його суміші з воднем та гелієм, а для захисту металу ванни від окислення при зварюванні легованої сталі, міді, нікелю – суміш аргону з 5...8% водню. При зварюванні цирконію та титану водень взагалі не можна використовувати через велику його спорідненість з цими металами. При накладанні другого валика при двошаровому зварюванні або піджарці кореня шва рекомендують застосовувати гелій. При зварюванні низьковуглецевої та низьколегованої сталі в якості плазмоутворювального та захисного газів можна використовувати вуглекислий газ.

Плазмовою дугою зварюють листи товщиною до 9,5 мм в стик без розроблення кромки та присадного металу. У ряді випадків успішно зварюють за один прохід листи товщиною до 12,7 мм. При з'єднанні листів товщиною до 25 мм потрібна V – або U–подібна підготовка кромки, причому глибина та кут розроблення значно менші, ніж при аргонодуговому зварюванні. Найбільші переваги зварювання плазмовою дугою проявляються при з'єднанні товстих листів без розроблення кромки та без присадного металу.

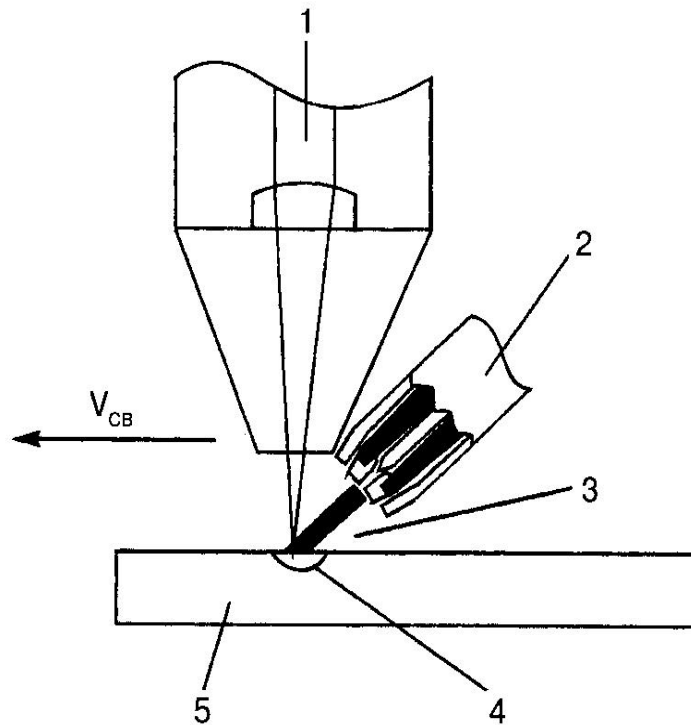
В останні роки отримав поширення спосіб плазмово-порошкового зварювання, при якому порошок подають у плазму і заповнюють розроблення. Спосіб перевірено при механізованому та ручному зварюванні металу товщиною 1...50 мм у всіх просторових положеннях.

При виконанні зварювання плазма–MIG є можливість роздільно регулювати тепловкладення в основний та присадний метал та зварювати зразки товщиною 16 мм з корозійно тривкої сталі з розробленням кромки за один прохід. При мінімальному перемішуванні основного металу з рідким присадним з'являється можливість отримувати шви будь-якої форми перерізу без зміни форми розроблення.

Останнім часом ведуться інтенсивні роботи в галузі лазерно-плазмового зварювання, при якому зварювальна ванна нагрівається плазмовою дугою та променем лазера (*рис.16*). При цьому лазерний промінь, проходячи через плазмову дугу, суттєво підвищують температуру плазми, тим самим контрагуючи дуговий стовп, та збільшує густину потужності гібридного джерела теплоти.

Плазмове наплавлення застосовують при відновленні деталей та, в більшій мірі, при виготовленні деталей. Переваги процесу – висока якість покриттів, можливість отримувати наплавлений шар із заданими складом, структурою та фізико-механічними властивостями без небажаних домішок, пор та інших дефектів. Є можливість одержувати гладкі покриття з

невеликим припуском на механічну обробку, особливо при нанесенні дорогих матеріалів.



1 – промінь лазера; 2 – плазмотрон; 3 – плазмова дуга; 4 – зварювальна ванна; 5 – виріб

Рисунок 16 – Схема комбінованого лазерно-плазмового процесу

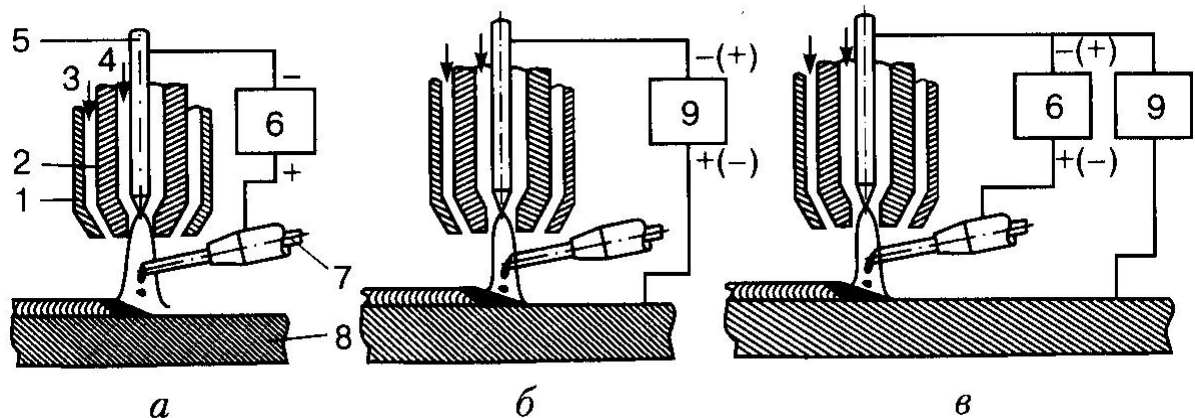
При плазмовому наплавленні використовують плазмову дугу, плазмовий струмінь або їх комбінацію. У залежності від застосовуваного присадного матеріалу способи наплавлення розподіляють на три основні групи:

- наплавлення дротом або прутками;
- наплавлення за нерухомою присадкою, викладеною або закріпленою на наплавлюваній поверхні;
- наплавлення порошком.

Схеми різних способів виконання плазмового наплавлення з подачею одного присадного дроту наведено на *рис.17*.

При наплавленні плазмовим струменем зі струмоведучим присадним дротом (*рис.17,а*) дуга горить в аргоні між вольфрамовим електродом-катодом та присадним дротом, який подається збоку під прямим кутом до осі

плазмотрону. Дуги живляться струмом прямої полярності, а між катодом і соплом постійно горить слабко точна чергуюча дуга (на схемі не зазначена).



а – плазмовим струменем зі струмоведучим присадним дротом; б – плазмовою дугою з нейтральним присадним дротом; в – подвійною дугою (1 – захисне сопло; 2 – плазмоутворювальне сопло; 3 – захисний газ; 4 – плазмоутворювальний газ; 5 – електрод; 6 – джерело живлення дуги опосередкованої дії; 7 – дріт; 8 – виріб; 9 – джерело живлення дуги прямої дії)

Рисунок 17 – Схеми плазмового наплавлення з присадкою одного дроту

Особливістю цього способу є досить незначне проплавлення основного металу, яке, в той же час, забезпечує високу міцність з'єднання наплавленого й основного металу.

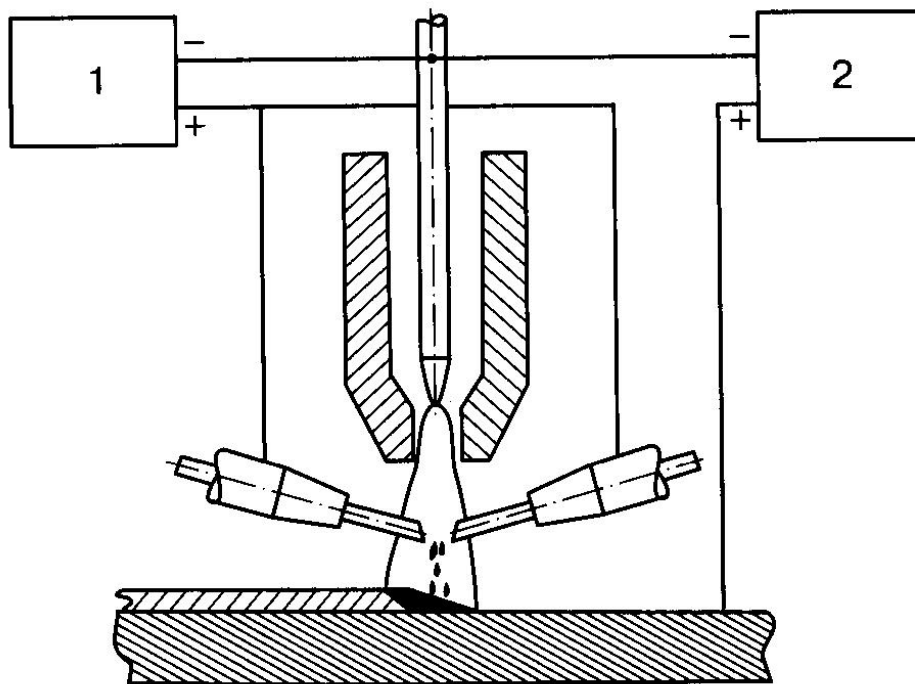
При наплавленні плазмовою дугою з подачею нейтрального присадного дроту (*рис 17, б*) основний метал нагрівається більш ефективно, а саме джерело нагріву є більш локальним, ніж плазмовий струмінь.

Наплавлення можна виконувати як дугою прямої полярності, так і зворотної. В останньому випадку завдяки катодному очищенню з'являється можливість наплавляти сплави, леговані алюмінієм, титаном та іншими елементами, що утворюють тугоплавкі оксиди, а також наплавляти деталі з алюмінієвих сплавів.

При наплавленні з подаванням нейтрального присадного дроту інтенсивність його плавлення нижча. В той же час, розбризування менше, знижується вигар легувальних елементів, попереджується надмірне розчинення карбідних зерен тощо.

Відмінною особливістю наплавлення подвійною плазмовою дугою зі струмоведучим присадним дротом (рис.17,в) є наявність двох дуг при прямій або зворотній полярності, які живляться зазвичай від автономних джерел. При цьому інтенсивність плавлення залежить від сили струму обох дуг, полярності, діаметру та місця плавлення присадного дроту. Даний спосіб за продуктивністю перевищує наплавлення плазмовою дугою з нейтральною присадкою, забезпечуючи при цьому менше проплавлення основного металу. У порівнянні з наплавленням плазмовим струменем із струмоведучим присадним дротом від більш універсальний та надійний.

При напавленні комбінованою плазмовою дугою із присадкою з двох дротів (рис.18) останні подаються назустріч один одному, що дозволяє компенсувати їх магнітне дуття та підвищувати продуктивність до 30 кг/год.



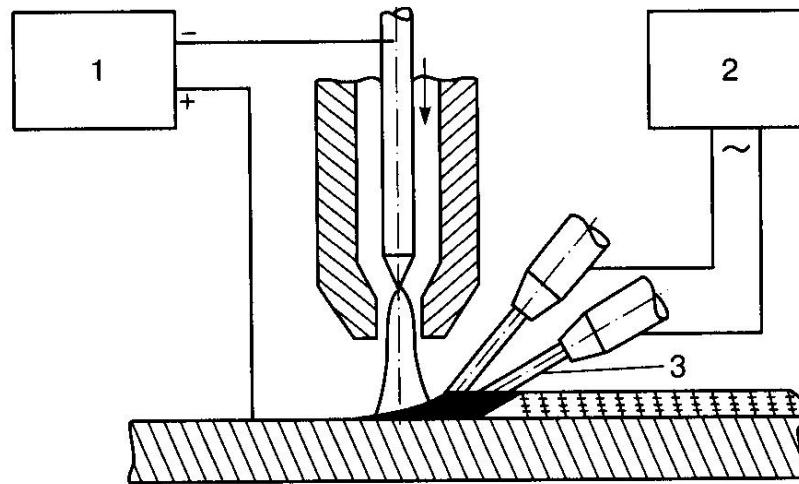
1 – джерело живлення дуги електрод – дріт; 2 – джерело живлення дуги електрод – виріб

Рисунок 18 – Схема плазмового наплавлення з присадкою двох дротів

В якості захисного газу використовують аргон або аргон з воднем; плазмоутворювального газу – аргон або аргон-гелієву суміш. Процес наплавлення є стабільним, нечутливим до коливань довжини дугового

проміжку: зміна відстані між плазмотроном та виробом на ± 6 мм не чинить суттєвого впливу на проплавлення основного металу.

Плазмове наплавлення двома гарячими дротами виконують за схемою, наведеною на *рис.19*.



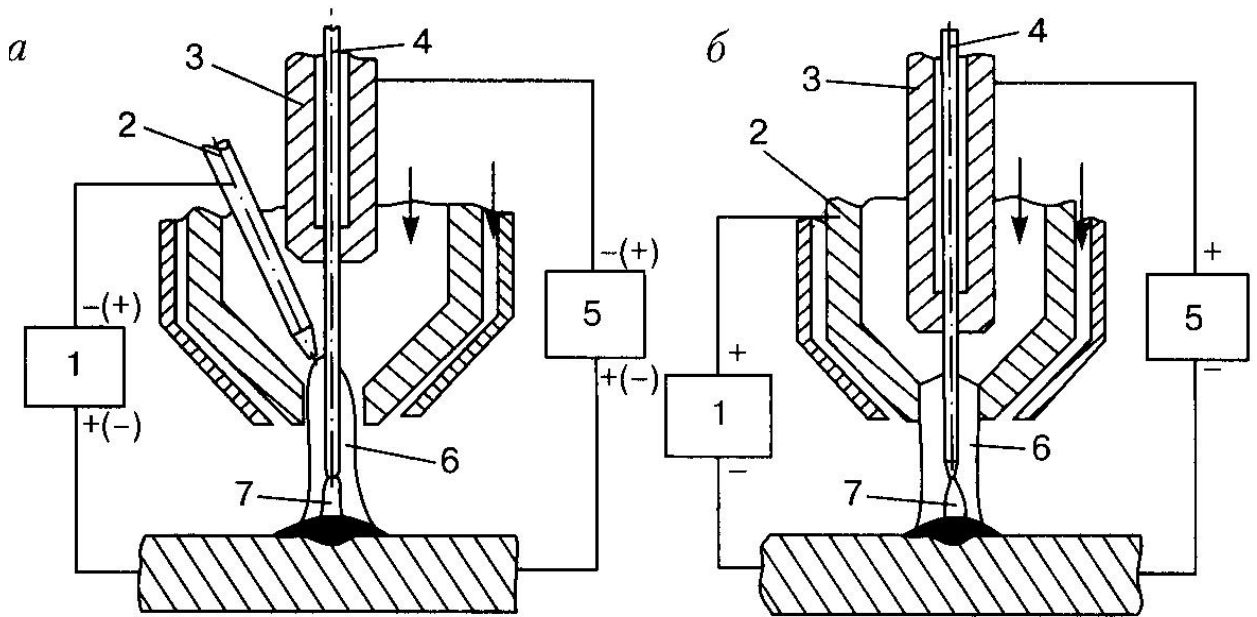
1 – джерело постійного струму для живлення дуги; *2* – джерело змінного струму для підігріву дротів; *3* – присадні дроти

Рисунок 19 – Схема плазмового наплавлення „гарячими” дротами

При цьому два присадні дроти зазвичай мають діаметри 1,6 або 2,4 мм, розташовані V- подібно під кутом 30° , підключені до автономного джерела та подаються у зварювальну ванну, яка створюється потужною плазмовою дугою прямої дії. Дріт нагрівається за рахунок джоулевої теплоти майже до температури плавлення, що дозволяє підвищити продуктивність до 40...50 кг/год. така схема дозволяє достатньо гнучко керувати процесом наплавлення.

Отримало розповсюдження й дугове наплавлення плавким електродом (*рис.20*). Наплавлення (*рис.20,а*) починають з підпалу плазмової дуги між розташованим ексцентрично відносно сопла неплавким електродом та виробом. Дуга між електродним дротом, який подають по осі плазмотрону, та виробом збуджується спонтанно, без короткого замикання, і горить стабільно при зміні швидкості в дуже широкому діапазоні. Процес можна вести як на прямій, так і на зворотній полярності.

Для підвищення допустимої сили струму застосовують мідний водоохолоджуваний електрод або, що більш ефективно, використовують в якості неплавкого електроду сопло (рис.20,б).



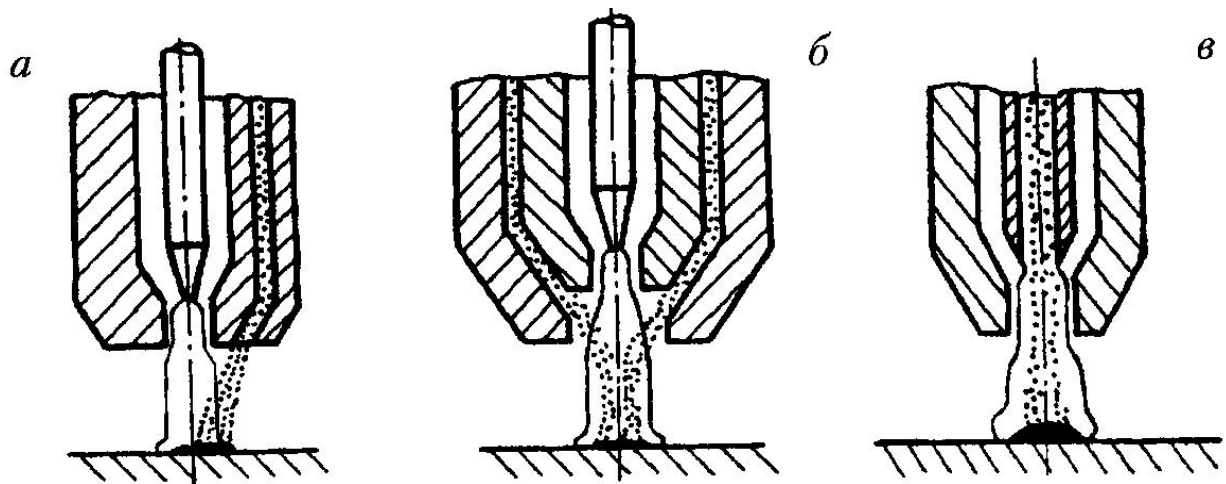
а – з неплавким електродом; *б* – зі струмоведучим соплом (1 – джерело живлення плазмової дуги; 2 – вольфрамовий або водоохолоджуваний мідний електрод; 3 – мундштук; 4 – електродний дріт; 5 – джерело живлення дуги з плавким електродом; 6 – плазмова дуга; 7 – дуга плавкого електроду)

Рисунок 20 – Схема плазмового наплавлення плавким електродом

При напавленні *по нерухомій присадці* останню укладають, насипають, напилують або іншим шляхом наносять заздалегідь на поверхню або ж подають попереду дуги під час напавлення.

Останнім часом набуло поширення *плазмово-порошкове* напавлення (ППН) вирізняється малою глибиною пропавлення основного металу, прецизійною точністю, високою продуктивністю та можливістю напавлення різноманітних сплавів. Для ППН використовують плазмотрони із зовнішньою та внутрішньою схемами вводу порошку в дугу. У першому випадку порошок надходить одним або декількома боковими каналами (рис.21,а), а у другому порошок потрапляє до дуги у вигляді розподіленого потоку через вузьку щпарину між плазмотворювальним і фокусуєчим

соплами (рис.21,б). Можливим є також ввід порошку через трубчастий катод (рис.21,в).



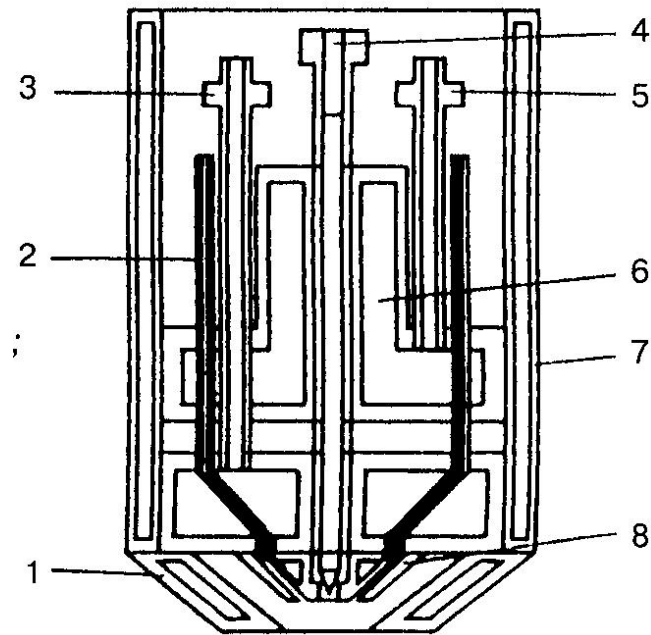
а – зовнішня; б – внутрішня; в – через трубчастий катод

Рисунок 21 – Схеми вводу присадного порошку в дугу

При застосуванні плазмотронів із зовнішньою подачею порошку (рис.21,а) відмічають великі втрати порошку та суттєві витрати енергії. Крім того, односторонній ввід порошку деформує дугу, порушує стабільність процесу та погіршує формування валика.

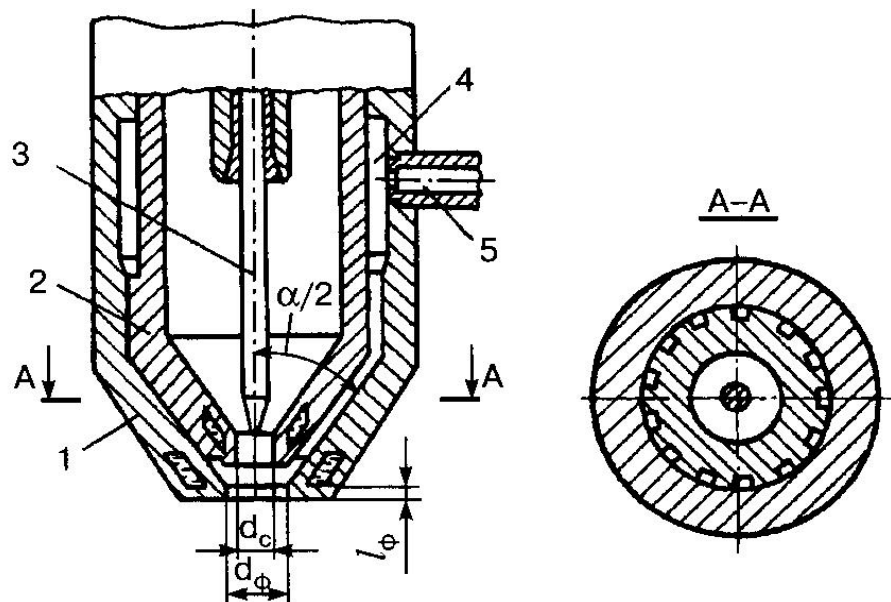
Відмінністю порошкових плазмотронів підвищеної потужності є подача порошку плазмоутворювальним газом через головне центральне сопло. Інколи подачу порошку катодним каналом суміщають із звичайним введенням боковими каналами (рис.22). Центральне введення порошку має певні переваги: потік порошку стає більш компактним, стисненим; подовжується траєкторія руху часток порошку в плазмовій дузі, забезпечуючи їх розплавлення до підходу до поверхні оброблюваної деталі.

У плазмотронах фірми „Плазма-Майстер Лтд” (Київ) використовують внутрішню схему введення порошку в дугу. При цьому незалежно від конструкції плазмотрон має розподільчий вузол (рис.23) з рівномірно розташованими по колу поздовжніми пазами, якими порошок під певним кутом вводять в дугу, та кільцевою розподільчою камерою.



1 – водоохолоджуване сопло захисного газу; 2 – боковий ввід порошку; 3 – струмовід чергуючої дуги; 4 – подача порошку катодним каналом; 5 – головний струмовід; 6 – інтенсивно охолоджуваний водою катодний блок; 7 – водоохолоджуваний корпус; 8 – плазмотворювальне та порошкове сопло

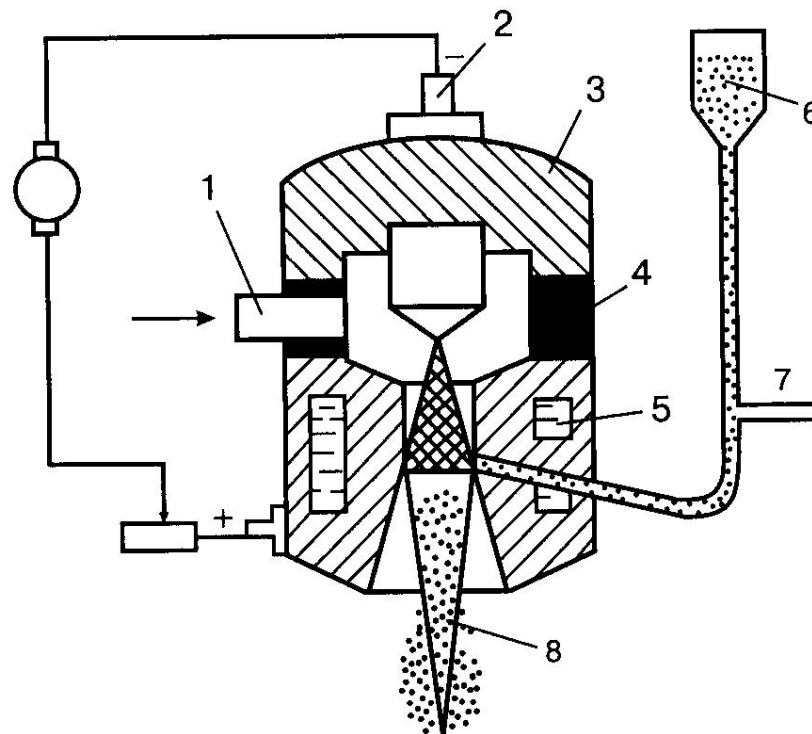
Рисунок 22 – Схема пальника високої потужності для плазмово-порошкового наплавлення



1 – фокусувальне сопло; 2 – стабілізуюче сопло; 3 – електрод; 4 – кільцева розподільча камера; 5 – вхідний штуцер

Рисунок 23 – Вузол розподілення та введення порошку в дугу

При плазмовому напиленні в якості напилюваних матеріалів застосовують порошки, дріт, прутки. Схему виконання плазмового напилення з використанням порошку наведено на *рис. 24*.



1 – підвід плазмоутворювального газу; 2 – катод плазмотрона; 3 – корпус катода; 4 – ізолятор; 5 – корпус анода; 6 – порошковий живильник; 7 – підвід газу, що транспортує порошок; 8 – плазмова дуга; 9 – джерело живлення

Рисунок 24 – Схема плазмового напилення порошком

До переваг процесу відносять можливість отримання покриттів з більшості матеріалів, що плавляться без розкладення та обмеження за температурою плавлення.

3.2 Лазерні технології

Натепер у промисловості в основному використовують газові CO₂-лазери та твердотільні Nd:YAG-лазери, що працюють у інфрачервоному та ближчих до інфрачервоного діапазонах спектру.

У CO₂-лазерах робоче середовище складається із суміші вуглекислого газу, азоту та гелію. Найпоширенішим є співвідношення газів CO₂ – 5%, N₂ – 10%, решта – гелій. Принцип роботи усіх CO₂-лазерів однаковий, проте в їх

конструкції є відмінності в залежності від методів збудження та охолодження газової суміші в резонаторі. Активним середовищем в цих лазерах є вуглекислий газ. Азот сприяє підвищенню потужності лазера, передаючи енергію молекул CO_2 та дозволяючи їй залишатися на верхньому рівні лазерного випромінення, гелій пришвидшує відвід теплоти від газової суміші. CO_2 -лазери мають потужність від десятків ватт до 50...70 кВт при ККД до 10%. Ці лазери найбільш широко використовують для різання, зварювання та поверхневої обробки.

Nd:YAG-лазер – твердотільний, в якому в якості активного елемента використовують алюмоітрієвий гранат з неодимом. Ці лазери працюють в імпульсному та неперервному режимах при ККД від 3 до 5% та відрізняються високою ефективністю та надійністю. Проте їх максимальна потужність – 500...600 Вт. Для підвищення цих значень використовують декілька активних елементів потужністю до 5 кВт, які передають промінь оптичним волокном. Волоконні лазери мають можливість транспортування променя оптичним світловодом на відстань до 300 м та більше. Лазери такої конфігурації поширені в автомобілебудуванні.

На заміну лампової накачки приходять лазери, що ґрунтуються на діодному принципі. У таких лазерах одиничний випромінювальний елемент - власне лазерний діод з потужністю випромінення близько 5 мВт. Для отримання більшої потужності набирають пакет з таких діодів. До переваг діодних лазерів слід віднести високий ККД (до 50%), що визначає нижчі експлуатаційні витрати, а також невеликі розміри, що дозволяє легко вбудовувати їх в існуючі виробничі системи.

Щоб отримати максимальний зиск від лазерної обробки, необхідно знати параметри лазерного променя та властивості оброблюваного матеріалу. Довжина хвилі лазерного випромінення – найголовніший фактор у визначенні можливості застосування лазера для певного виду робіт. Зокрема, поглинання енергії та нагріву не буде, якщо довжину хвилі обрано невірно. Кут падіння променя на поверхню та його поляризаційні характеристики

визначають, яку кількість випромінення буде відбито від оброблюваної поверхні.

Для підвищення ефективності лазерного зварювання (зниження вимог до підготовки кромки, зменшення небезпеки утворення стоншень, пор, підрізів, зменшення капітальних та інших витрат) використовують різноманітні прийоми та способи, що включають:

- імпульсно-періодичну модуляцію випромінення, осциляцію сфокусованого лазерного випромінення, подачу додаткового потоку газу;
- застосування флюсів і присадного дроту;
- поєднання лазерного нагріву з плазмовим, дуговим або високочастотним (гібридні та комбіновані способи зварювання).

Імпульсно-періодичні режими лазерного зварювання використовують як для збільшення глибини проплавлення, так і для проплавлення менше 1 мм. При цьому значно зменшується розмір ЗТВ, підвищується стабільність процесу, усувається небезпека пропалів.

При осциляції сфокусований промінь періодично заглиблюють у зварювальну ванну за рахунок коливань фокальної площини відносно зварюваного виробу. Для цього використовують спеціальні механічні або п'єзоелектричні сканатори, лінзи або об'єктиви, що забезпечують варіювання частоти в діапазоні від 0 до 150 Гц з амплітудою коливань, яка дорівнює товщині зварюваних деталей.

Осциляція випромінення забезпечує збільшення глибини проплавлення на 40%. Ширина шва при цьому зростає на ~30%, а коефіцієнт форми шва збільшується на 10...15%.

Ефективність проплавлення може бути збільшена подаванням у зону зварювання додаткового потоку газу під певним тиском. Додатковий потік спричиняє вплив на параметри плазми в області взаємодії випромінення з матеріалом та на гідродинамічні процеси в каналі проплавлення.

Залучення присадного матеріалу дає можливість регулювати в широких межах хімічний склад шва, забезпечити потрібні властивості зварних

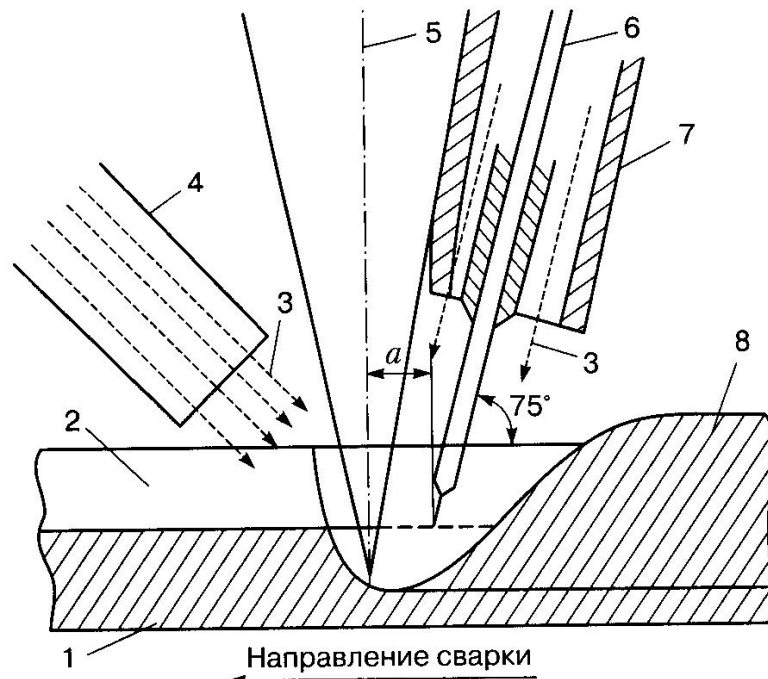
з'єднань, виключити такі дефекти, як нерівномірність проплавлення, пори у корені шва, гарячі та холодні тріщини, а також знизити вимоги до точності складання деталей під зварювання (допускаються зазори до 30...50% від товщини стінки, депланація – до 50%). Особливістю прийому є використання дроту малого діаметру (до 1 мм) та у точній подачі його під випромінення за допомогою спеціальних механізмів ($V_{n.d.} = 90...100$ м/год.).

При виготовленні тонкостінних (до 1,0 мм) сталевих виробів з нещільно прилягаючими кромками застосовують технологію зварювання розфокусованим променем з подачею порошкового присадного матеріалу. У цьому випадку зварювані кромки складають із зазором, що відповідає товщині деталей, і притискають до мідної підкладки.

Необхідність застосування флюсів при лазерному зварюванні спричинена тим, що при достатньо високих швидкостях зварювання (400...600 м/год.) не встигає відбутися повна дегазація зварювальної ванни й у верхній частині шва утворюються пори. Використання флюсу доцільне при його нанесенні тонким (<0,1 мм) шаром, що щільно зчіплюється із зразком. При відносно товстих та нещільно зчеплених шарах потужність випромінення поглинається у флюсі та не встигає передатися металу.

Підвищення ефективності процесу лазерного зварювання може бути досягнуте суміщенням лазерного джерела з іншими. Показано, що випромінення CO₂-лазера стабілізує електричну дугу плавким електродом, що горить у CO₂, „прив'язуючи” її до діючого на метал сфокусованого променя та примушує опускатися в паро газовий канал. Лазерно-дугове зварювання забезпечує більш „м'який” термічний цикл, який регулюють, варіюючи відстань a між зонами дії лазерного випромінення та дуги (див.рис.25). Як показали дослідження, застосування лазерно-дугового зварювання при фіксованій потужності лазерного випромінення доцільне до певної товщини зварюваного металу, вище якої глибина проплавлення не збільшується, незалежно від зниження швидкості зварювання.

У промислових масштабах лазерно-дугове зварювання фірма Volkswagen використовує при виготовленні дверей автівок.

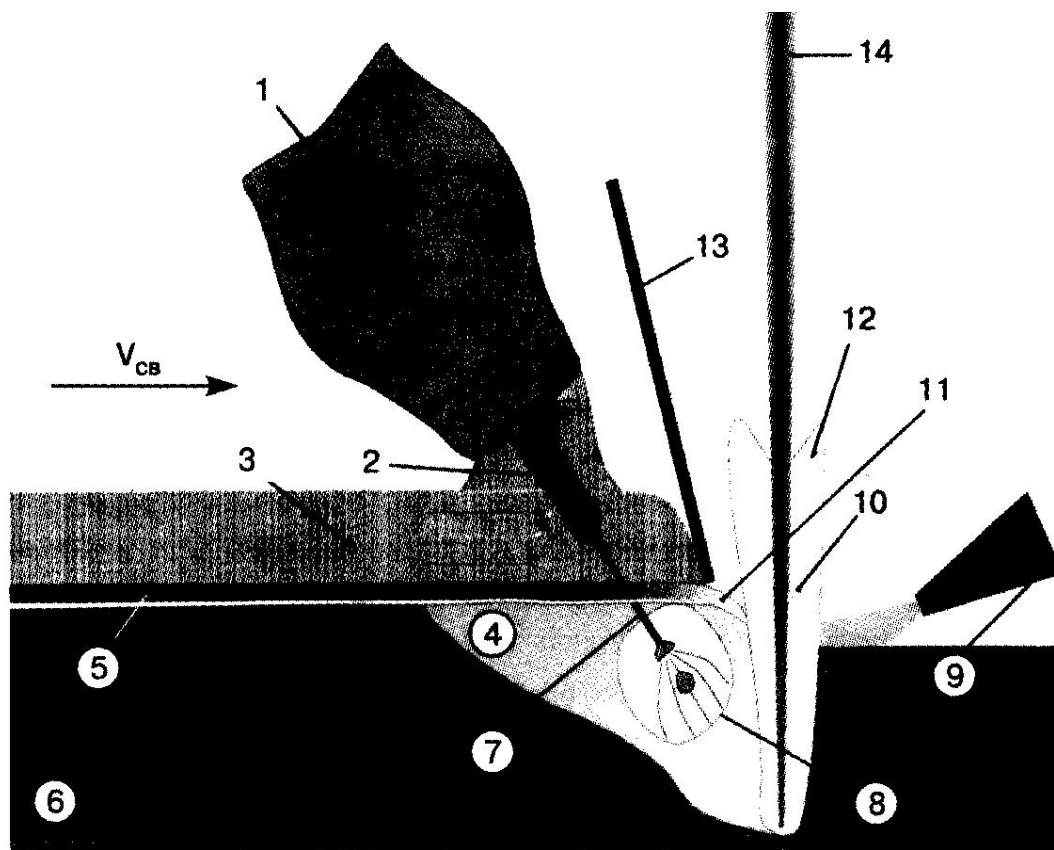


1 – виріб; 2 – розроблення; 3 – захисний газ; 4, 7 – сопло; 5 – лазерний пучок;
6 – електродний дріт; 8 – шов (a – відстань між джерелами теплоти)

Рисунок 25 – Схема процесу лазерно-дугового зварювання з використанням дуги, що горить на плавкому електроді

Проводяться дослідження щодо використання лазера та дугового зварювання плавким електродом під флюсом (рис. 26). Таке поєднання джерел виявилось реалізувати складніше: флюс провалюється у паро газовий канал лазерного променя, лазерне випромінення поглинається флюсом, а не зварюваним матеріалом. У досліджуваному варіанті захисний газ, необхідний для зварювання лазерним променем, надходив проти напрямку зварювання, щоб здувати флюс, який може попасти в зазор між зварюваними листами, а за лазерним променем встановлювалася роз'єднувальна пластина, яка перешкоджає потраплянню флюсу в зону, розплавлену лазерним променем.

Експерименти проводили на різних марках сталей товщиною 8...38 мм при потужності лазера 20кВт. Були отримані якісні шви, за формою відмінні від швів, виконаних лише лазерним зварюванням або під флюсом (рис.27).



1 – бункер для флюсу; 2 – контактна трубка; 3 – флюс; 4 – річка ванна; 5 – твердий шлак; 6 – метал шва; 7 – дротяний електрод; 8 – порожнина шва з дугою; 9 – струмінь гелію; 10 – паро газовий канал; 11 – рідкий шлак; 12 – плазма з парою металу; 13 – роз'єднувальна пластина; 14 – лазерний промінь

Рисунок 26 – Схема гібридного лазерно-дугового зварювання під флюсом

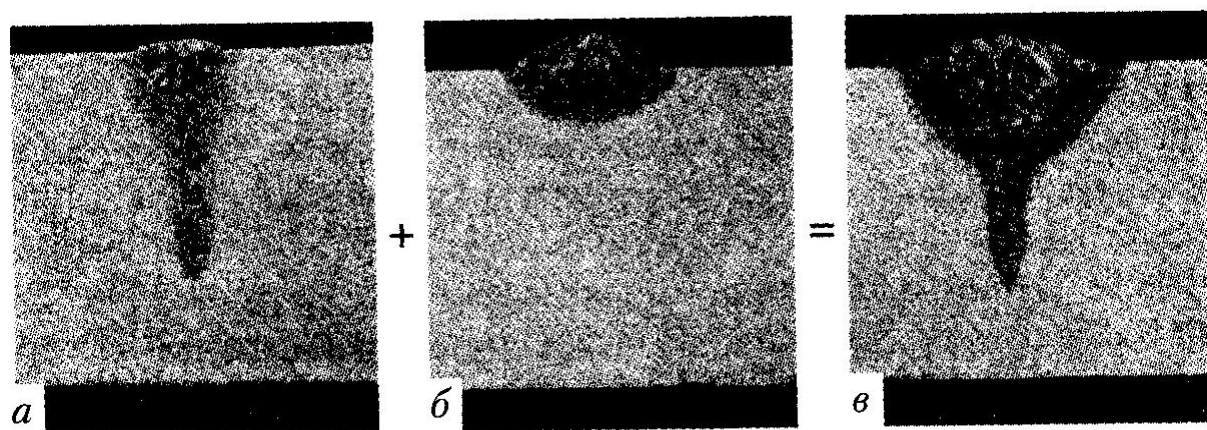


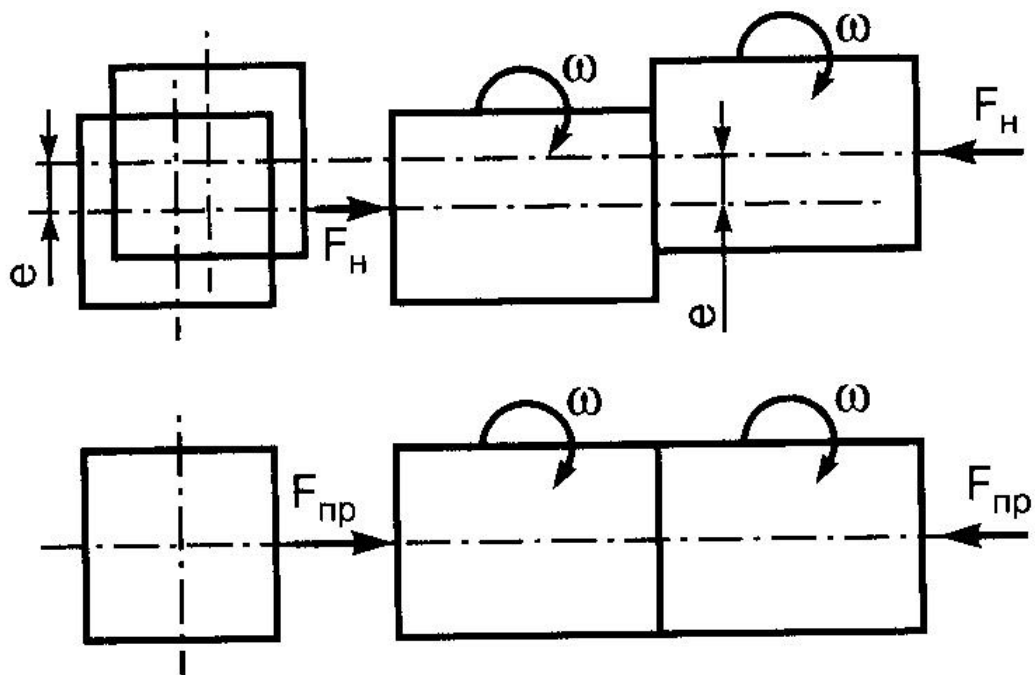
Рисунок 27 – Макрошліфи швів, виконаних лазерним (а), дуговим (б) та лазерно-дуговим (в) зварюванням

3.3 Фрикційні технології

Фрикційні технології базуються на використанні тепла, що виділилося під час сухого тертя сполучених поверхонь. Тепловиділення при терті має місце не лише на поверхнях точок фізичного контакту. Деформування мікро виступів, на яке витрачається деяка частка енергії при терті, також є причиною тепло генерування. Згадана теплота може бути використаною для зварювання, наплавлення, формозміни та зміцнення.

Інерційне зварювання тертям – спосіб, запатентований фірмою Caterpillar Tractor (США) у 1962 р. Принцип способу полягає у використанні енергії, накопиченої маховиком, що обертається, яка в процесі зварювання перетворюється на теплоту. Шпиндель з насадженим на нього маховиком заданої маси розганяють, потім привід відключають, а заготовки стискають із заданим зусиллям.

У 1971 р. фірмою Friction Welding Co було розроблено спосіб орбітального зварювання тертям (рис.28).



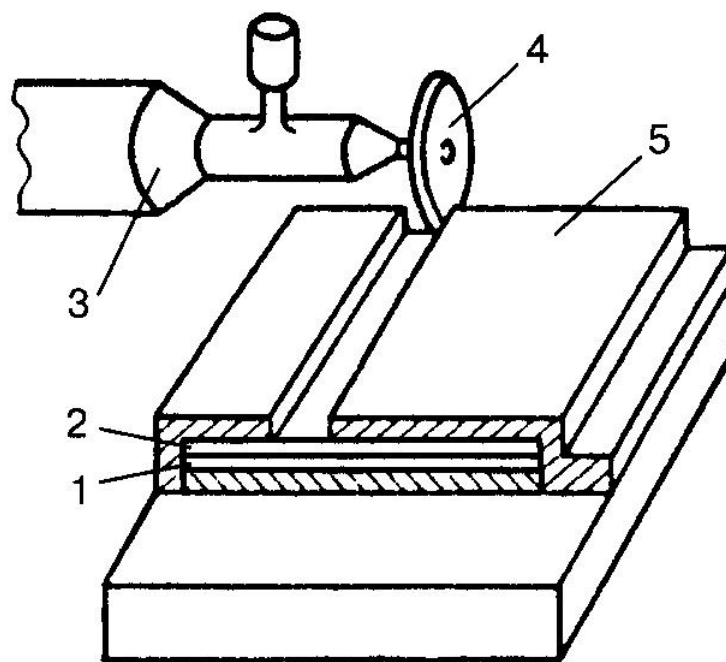
а – стадія нагріву; б – стадія проковування

Рисунок 28 – Схема орбітального зварювання тиском

Суть способу полягає у тому, що рухому деталь без обертання переміщують круговою орбітою відносно нерухомої деталі. Після нагріву

поверхневих шарів ексцентриситет є зменшують до нульового значення та виконують проковування шва. Орбітальне зварювання тертям дозволяє зварювати заготовки, що мають переріз довільної форми, за однакового відносного переміщення усіх точок контактних поверхонь, забезпечуючи тим самим рівномірний нагрів у зоні з'єднання. До недоліків процесу відносять складну конструкцію машин та ненадійність затискних пристроїв внаслідок дії на них значних інерційних сил.

Спосіб *роликового зварювання тертям* (рис.29) був розроблений фірмою Gook Technologies (Велика Британія).



1,2 – зварювані заготовки; 3 – шпиндель; 4 – обертальний ролик; 5 – притискач

Рисунок 29 – Схема роликового зварювання тертям

При виконанні зварювання цим способом до стиснених заготовок з листового матеріалу підводять ролик, що обертається з кутовою швидкістю 1600 рад/с. Швидкість його переміщення відносно зварюваних заготовок складає 0,2...0,5 МПа. Обертальний ролик за рахунок тертя ініціює виділення теплової енергії та генерує ультразвукові коливання, які сприяють руйнуванню оксидних плів. Застосування роликового зварювання перспективне для з'єднання тонколистових матеріалів.

Спосіб зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП, англійський еквівалент FSW) було запатентовано Британським інститутом зварювання 1991 року (рис.30).

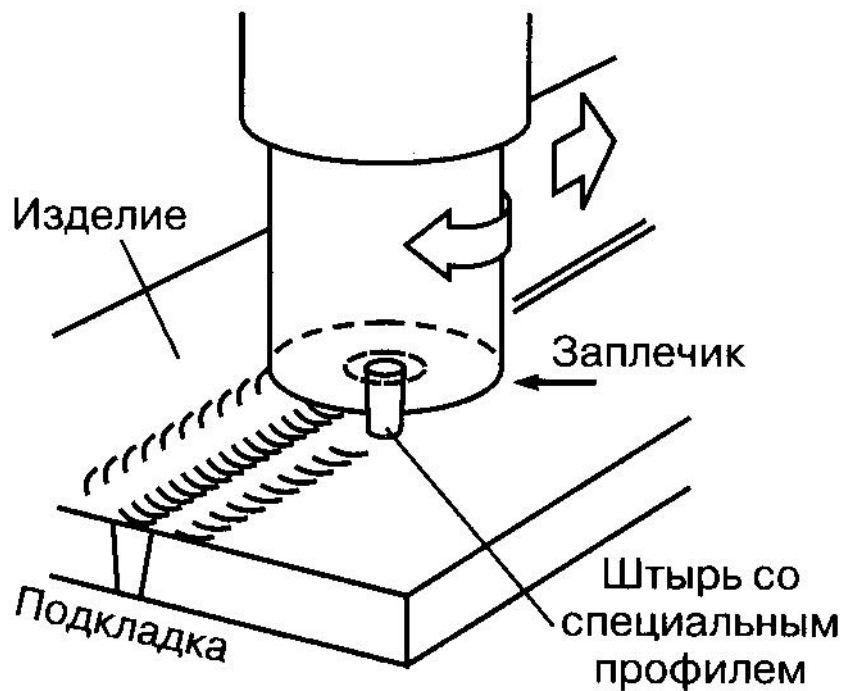


Рисунок 30 – Схема процесу зварювання тертям з перемішуванням

Особливістю способу є використання спеціального інструменту, що обертається, з потовщеною частиною – напличником (буртом) та виступаючою частиною – штирем (стрижнем). Штир, що обертається, занурюють у зварювані деталі, при цьому в результаті тертя виділяється теплота, а метал переходить у тістоподібний стан. Після цього інструменту надають поступальний рух зі швидкістю зварювання, і матеріал заготовок, переміщуючись із зони нагріву в зону охолодження, огинає штир і утворює з'єднання. Такий шов є несиметричним відносно своєї поздовжньої осі, бо матеріал витісняється інструментом з одного боку на інший. На завершальному етапі (в кінці шва) інструмент піднімають до повного виходу штиря зі стику та зупиняють.

ЗТП застосовують в основному для сполучення матеріалів з порівняно низькою температурою плавлення (алюмінієві, магнієві сплави).

До переваг способу зазвичай відносять наступне:

- властивості основного металу зберігаються краще, ніж при зварюванні плавленням;
- менший рівень залишкових напружень та деформацій зварних з'єднань;
- можливість отримання з'єднань у всіх просторових положеннях;
- немає потреби застосовувати присадні матеріали, захисні гази та флюси;
- відсутність шкідливих аерозолів та ультрафіолетового випромінення при зварюванні;
- можливість отримання якісних швів на сплавах, що складно зварюються плавленням;
- відносну простоту автоматизації процесу;
- високу ефективність використання електроенергії.

Основні недоліки способу:

- Необхідність застосування громіздкого зварювального устаткування;
- Наявність невеликого послаблення шву (0,1...0,2 мм);
- Утворення на кінці кільцевого шву отвору, рівного діаметру інструменту;
- Необхідність застосування ввідних та вивідних планок;
- Відсутність стандартів на даний спосіб зварювання та підготовлених спеціалістів.

Перед зварюванням поверхні зварюваних деталей очищують від мастильних речовин, іржі та інших забруднень. Оксидну плівку зазвичай не видаляють. Складання стикового з'єднання виконують на потужних підкладках за допомогою притискних пристроїв, що надійно фіксують заготовки. При складанні листів товщиною 1,6 мм зазор не повинен перевищувати 0,2 мм, а для товщин від 12,5 мм – до 1,25 мм.

Основною відмінністю макроструктури швів, виконаних ЗТП, є утворення в центрі з'єднання ядра, яке незалежно від сплаву містить так звані „річні кільця”. Форма ядра дещо відрізняється в залежності від складу зварюваного сплаву. На *рис.31* наведено схему зон зварного з'єднання алюмінієвих сплавів, виконаних ЗТП. До ядра примикає складний профіль, який

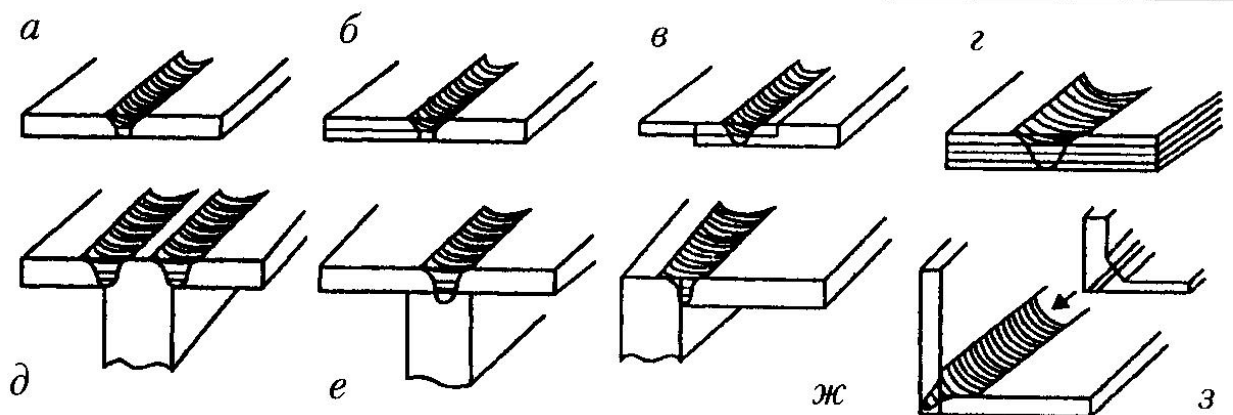
утворює верхню частину шва та по ширині дещо перевищує ширину наплічника. У цій зоні спостерігається деяке зменшення товщини металу (0,1...0,2 мм) за рахунок контакту наплічника інструменту та поверхні заготовок.



Рисунок 31 – Схема зон стикового з'єднання, виконаного ЗТП

На підставі дослідження мікроструктур зварних з'єднань різних алюмінієвих сплавів виділяють чотири зони зварного з'єднання, виконаного ЗТП. Безпосередньо до зони А (основному металу) примикає зона В, де метал заготовок залишається недеформованим і змінює свою структуру лише під впливом нагріву. Тому зону В названо зоною термічного впливу (ЗТВ). ЗТВ межує із зоною С, де метал піддається значним пластичним деформаціям і нагріву (зона термомеханічного впливу). Наступна зона D обмежена ядром зварного з'єднання і її називають зоною динамічної рекристалізації. Експериментальні дослідження TWL показали, що максимальна температура при ЗТП складає близько 70% температури плавлення.

За допомогою ЗТП можна отримувати будь-які з'єднання (рис.32).



а – стикове; б – стикове-внапусток; в – внапусток; г – багатошарове внапусток; д – двох прохідне таврове; е – таврове прорізне; ж, з – кутове

Рисунок 32 – Типи з'єднань, виконаних ЗТП

Основні параметри процесу:

- Швидкість зварювання (переміщення інструменту);
- Частота обертання інструменту;
- Зусилля притискання та зусилля переміщення інструменту;
- Кут нахилу інструменту та його розміри

Режими встановлюють у залежності від типу матеріалу, форми та товщини зварюваних деталей. Отримання якісного шва залежить від правильного вибору параметрів режиму зварювання. Відмічено, що зі збільшенням частоти обертання інструменту температура в зоні зварювання підвищується, а зі зростанням швидкості зварювання – знижується. Тепло вкладення при ЗТП вдвічі менше, ніж при аргонодуговому.

Зварювання тертям термопластів практично не відрізняється від зварювання металевих матеріалів. Суть процесу зварювання пластмас полягає у наближенні макромолекул поєднуваних поверхонь в момент, коли між ними проявляються сили міжмолекулярної взаємодії. Перемішування в'язкого розплаву у зоні сполучення сприяє утворенню зварного з'єднання.

Практичне застосування знаходять два різновиди зварювання пластмасових деталей: зварювання тертям обертання (прямий та непрямий способи) та зварювання вібротертям.

Зварювання обертанням прямим способом виконують при осьовому переміщенні та обертанні однієї деталі відносно іншої. Зварювання обертанням непрямим способом виконують із застосуванням проміжного елемента, що є більш бажаним при поєднанні довгих та громіздких деталей. Зварювання тертям пластмас з відносним обертанням зварюваних заготовок, як і металів, виконують за двома схемами: звичайною (конвективною) та інерційною.

На зварювання пластмас помітний негативний вплив чинить волога, тому перед зварюванням їх слід сушити, нагріваючи. Вимоги, що висуваються до геометричних розмірів зварюваних заготовок, зумовлені необхідністю отримання симетричних теплових полів у стику та можливістю затискання заготовок. Виходячи з цього, для вирівнювання перерізу в стику

передбачають відповідні виступи та більш масивних деталях (рис.33). довжина виступу повинна складати 0,7...1,0 від товщини зварюваних кромок.

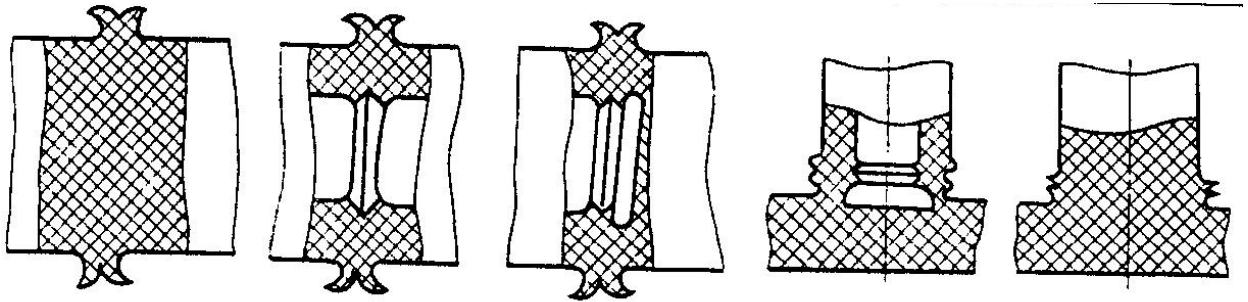


Рисунок 33 – Основні типи з'єднань, виконуваних зварюванням тертям

При поєднуванні заготовок великих діаметрів суцільного перерізу для забезпечення рівномірності нагріву та виключення не проварів у центральній частині стику рекомендують їх обробляти з нахилом 1...1,5° або з опуклістю по осі, щоб забезпечити площу перерізу на початку стадії нагрівання.

Для забезпечення точного центрування заготовок труб за всім периметром стику на їх торцях виконують спеціальне розроблення (рис.34).

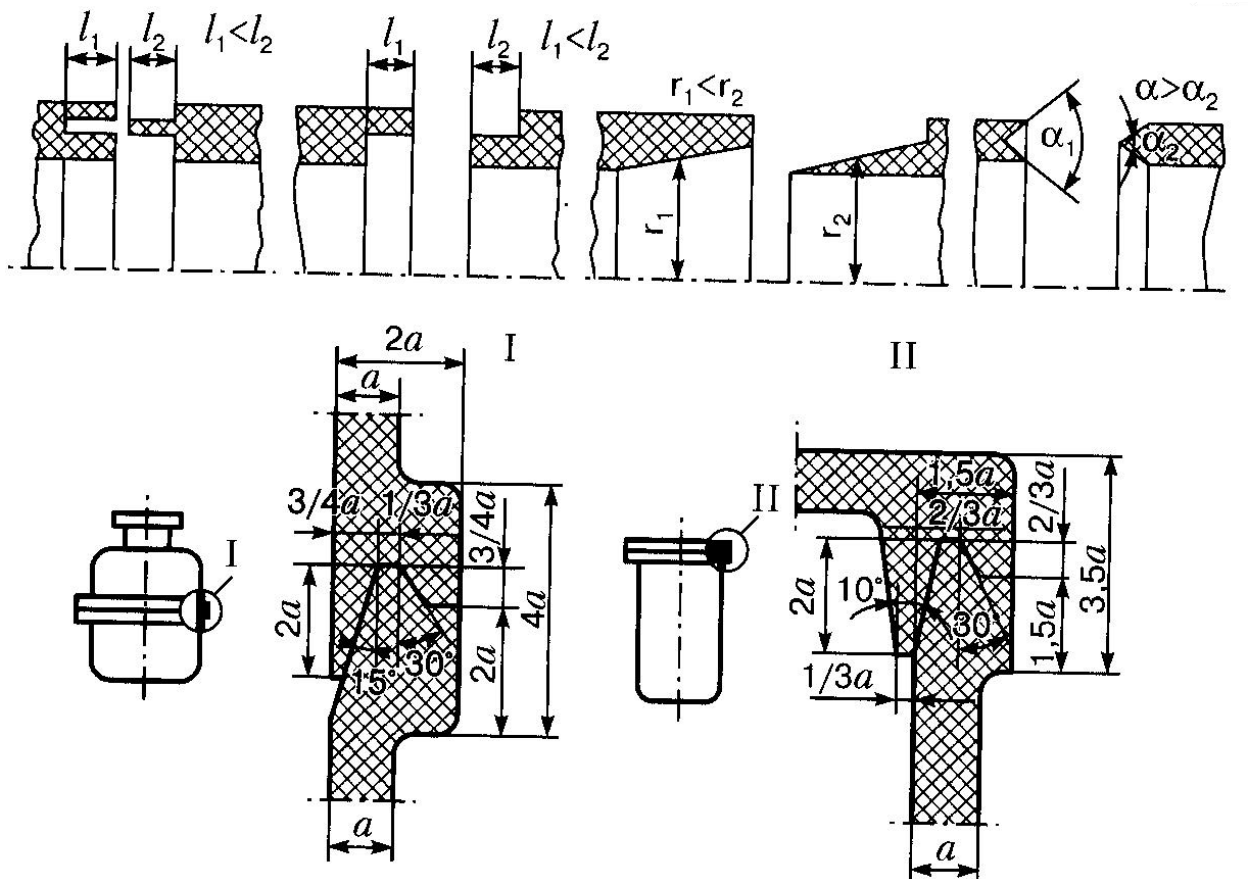


Рисунок 34 – Конструкції розроблення кромок труб під зварювання тертям

Тертям зварюють більшість типів пластмас, які мають стабільну в'язкість у широкому діапазоні температур: поліаміди, поліметилметакрилати, поліформальдегіди, полістироли, полікарбонати тощо. Внаслідок того, що забруднення зі стикованих поверхонь інтенсивно руйнуються та частково видаляються при нагріванні під час їх тертя, припуски на нагрів і проковування приймаються меншими, ніж при тепловому контактному зварюванні.

Промислового інтересу набули способи *наплавлення (наварювання) тертям*: прутком (витратним інструментом), гранульованим матеріалом та переміщуванням.

Суть способу наплавлення витратним інструментом полягає у тому, що при терті торця прутка наплавного матеріалу об поверхню заготовки відбувається їх розігрівання до пластичного стану та утворення металевих зв'язків між ними [342, 343, 366]. При цьому способі наплавлення (*рис.35*) пруток 2 наплавного матеріалу із зусиллям P притискають торцем до поверхні заготовки 1 та надають їй обертового руху.

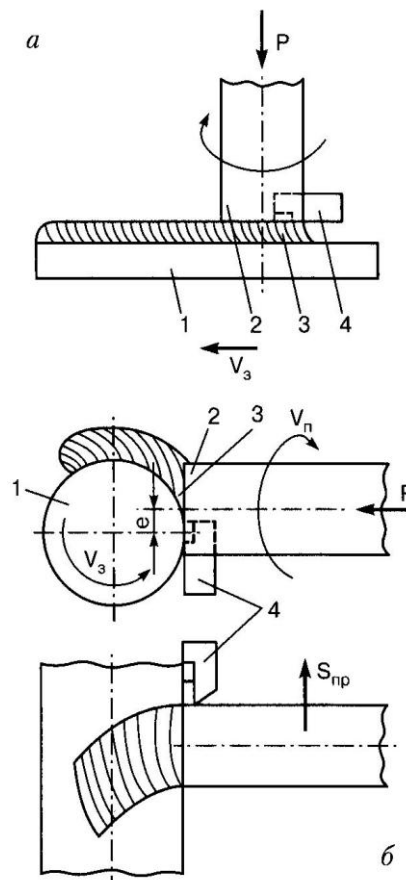


Рисунок 35 – Схема наплавлення тертям витратним інструментом на плоску (а) та циліндричну (б) поверхню

Під дією осьового навантаження P та обертання прутка зі швидкістю v_n відбувається направлене теплове зношування торця прутка і торець стає пластичним. Після цього наплавлювана заготовка приводиться у рух зі швидкістю v_3 . При цьому на деталь наносять (наплавляють) шар металу з певної товщини. У процесі нарощування шару на кінці прутка утворюється грибоподібна голівка, що видаляється різцем 4.

Продуктивність наплавлення (товщину наплавленого шару) на круглій деталі регулюють за рахунок зміщення e осі прутка відносно осі обертання заготовки.

Вважається перспективним спосіб наплавлення тертям, при якому через трубчастий витратний пруток подають гранульований присадний матеріал (стружка, порошок) реалізація подібних схем можлива лише за умови, що заготовка або пруток виготовлені з матеріалів, що мають більш високу температур плавлення, ніж наплавний метал або сплав.

3.4 Реалізація інноваційних підходів (на прикладі газотранспортної системи України)

Газотранспортна система України, зокрема магістральні газопроводи і газопроводи відгалуження, має сумарну довжину 35 тис. км, а транспортування нафти здійснюється магістральними трубопроводами завдовжки 4,6 тис. км. Однак майже половина з них експлуатується 25 років і більше. Значна частина магістральних трубопроводів відпрацювала свій розрахунковий ресурс. Тому актуальною проблемою є оцінка технічного стану і залишкового ресурсу вітчизняних нафто- і газотранспортних систем.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України виконує широке коло досліджень і розробок у галузі зварювання та діагностики магістральних нафто- і газопроводів.

Розвиток високопродуктивних систем трубопровідного транспорту, передусім підвищення тиску продукту, що транспортується, до 10 МПа і

більше, необхідність забезпечення високої надійності їх експлуатації актуалізують питання виробництва труб нового покоління, з поліпшеними службовими характеристиками. Окрім підвищеної міцності і товщини стінки, до таких труб висуваються істотно жорсткіші вимоги щодо в'язкості металу, його структурно-фазового стану, вмісту шкідливих домішок, забрудненості неметалічними включеннями. Задовольнити ці вимоги можна шляхом підвищення якості використовуваного листового прокату. Наукові і технологічні розробки, їх упровадження у процес виготовлення трубних сталей на металургійних заводах України значною мірою допомогли розв'язати це завдання. «Харцизький трубний завод» за участю ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України й інших організацій випустив дослідні партії й освоїв виробництво труб, стінки яких завтовшки до 25,8 мм, зокрема зі сталі класу міцності К65, що відповідає сталі Х80. Ці труби призначені для потужних газогонів, де робочий тиск газу 10 МПа. Виробництво труб з підвищеними експлуатаційними характеристиками потребує застосування нових, перспективних технологій зварювання. З цією метою інститут розробив технологію п'ятидугового зварювання під флюсом. Це дає змогу одержувати поздовжні шви труб зі стінкою завтовшки до 50 мм за два проходи, забезпечуючи високі показники механічних властивостей і якості зварних з'єднань (рис. 36).



Рисунок 36 – П'ятидугове зварювання під флюсом

Диспропорція показників холодо- і тріщиностійкості основного металу і зварних з'єднань, що виникла у процесі виробництва труб нового покоління, усувається за рахунок розробки і застосування нових зварювальних матеріалів. На *рис. 37* показано формування у металі шва сприятливої структури голчастого фериту за використання для багатодугового зварювання труб алюмінатно-основних флюсів. Поєднання флюсу цього типу з дротом, легованим титаном і бором, дає змогу за оптимального їх вмісту отримати структуру голчастого фериту з високим кутом розорієнтації та ударною в'язкістю металу понад 100 Дж/см² при -20 °С.

Найближчим завданням у галузі технології зварювання труб для високопродуктивних трубопроводів є організація промислового виробництва нових зварювальних матеріалів.

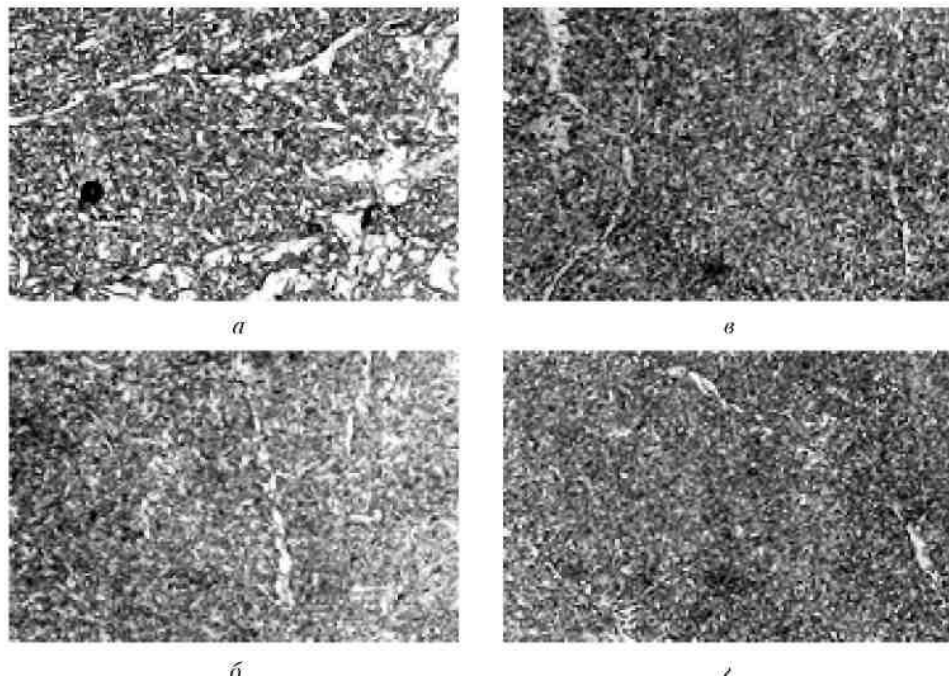


Рисунок 37 – Структура металу швів при зварюванні трубної сталі К60 (Х70): а — кислий флюс; б — флюс нейтрального типу; в — флюс з основністю 1,3; г — флюс з основністю 1,5

Одна з актуальних проблем будівництва і ремонту трубопроводів для транспортування нафти і газу — це механізація зварювання неповоротних стиків. Нестабільність геометричних розмірів стиків труб і забезпечення якості зварних швів потребують застосування потужної і важкої техніки, що не завжди

можливо через обмеженість робочого простору. Це зумовлює необхідність створення малогабаритного мобільного обладнання, яке можна доставити на робоче місце ручним способом, і технологій зварювання, що дають якісне формування швів за одностороннього зварювання без підкладок.

Розроблено технологію механізованого зварювання неповоротних стиків трубопроводів. Вона передбачає виконання корневих швів аргоново-дуговим зварюванням неплавким електродом з активуючим флюсом. Це забезпечує отримання якісного кореневого шва без підкладки, його товщина змінюється від 2,5 до 5 мм.

Заповнювальні проходи виконуються плавким дротом суцільного перетину в захисних газах або порошковим дротом з примусовим формуванням шва. Вже розроблено дослідні зразки відповідного обладнання для реалізації цих технологій і визначено режими технологічних процесів.

Контактне стикове зварювання широко практикується під час прокладання трубопроводів різного призначення на території країн СНД. Усього цим способом зварено понад 70 тис. км трубопроводів, зокрема в умовах Сибіру і Крайньої Півночі, де він використовується і сьогодні.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України тривають роботи з удосконалення технології та обладнання для контактено-стикового зварювання (рис. 38). Основні напрями досліджень передбачають:

- поліпшення технології з метою зниження потужності джерел живлення і підвищення продуктивності;
- створення технології зварювання труб з високоміцних сталей, зокрема X80, X100 з товщиною стінки до 30 мм;
- розробку нового покоління обладнання, що відрізняється високою маневреністю і механізацією допоміжних операцій;
- створення систем автоматичного ультразвукового контролю з'єднань, виконаних зварюванням тиском.

Лазерне зварювання має багато переваг порівняно з традиційними зварювальними технологіями. У розвинених країнах уже розпочато

дослідницькі роботи з метою застосування цієї технології для зварювання поздовжніх швів у процесі виготовлення труб і кільцевих швів — під час прокладання магістральних трубопроводів.

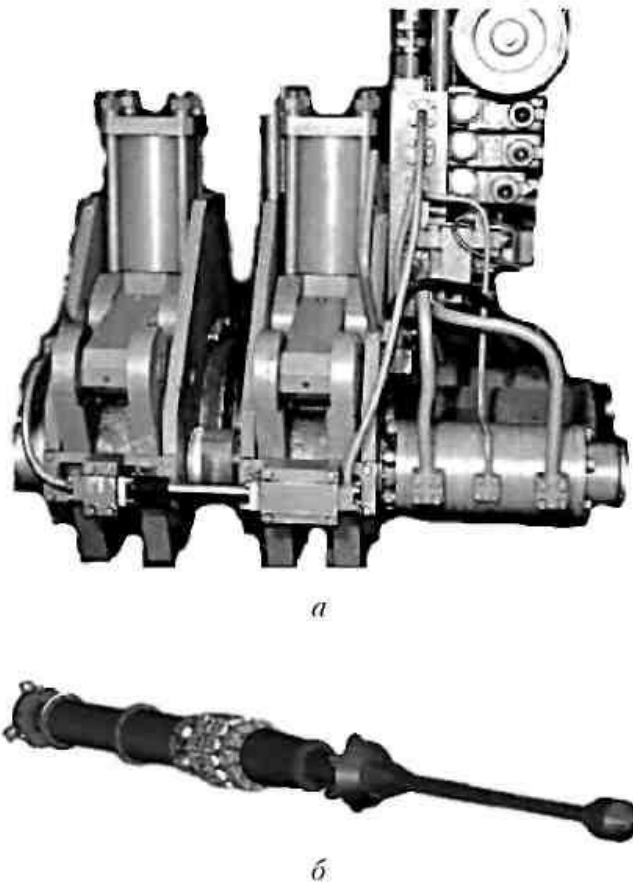
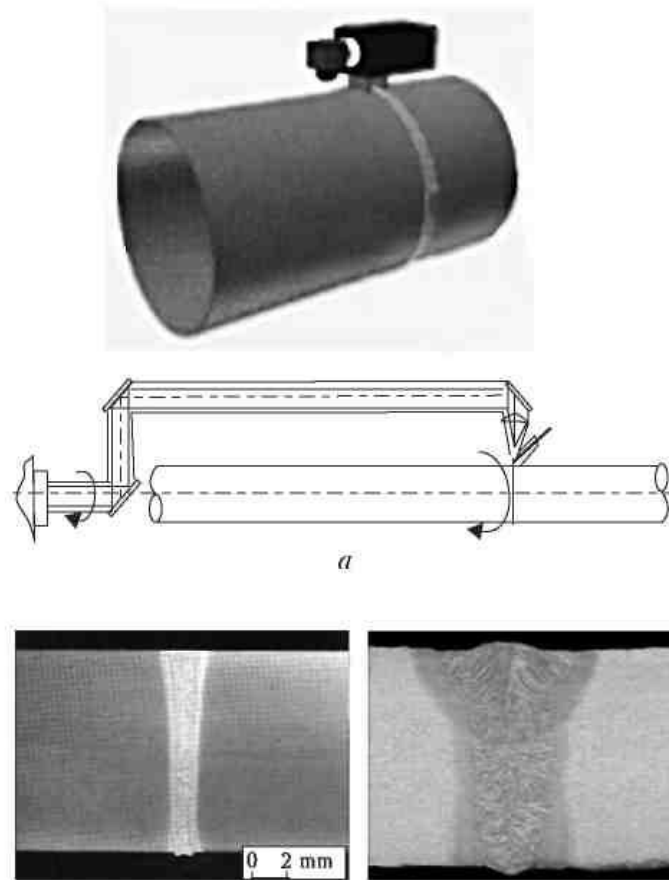


Рисунок 38 – Нове покоління устаткування для контактної-стикового зварювання трубопроводів: а — машина для зварювання трубопроводів Ж 114–219 мм (вага 2 т, потужність 100 кВА); б — внутрішньотрубна машина К1006 для зварювання труб Ж 1420 мм з товщиною стінки 22 мм (вага 16 т, потужність 600 кВА)

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона пропонує як лазерне, так і гібридне лазерно-дугове зварювання для розв'язання цих завдань. Застосування гібриду лазерного випромінювання і дугового зварювання плавким електродом різко збільшує продуктивність процесу і зменшує погонну енергію зварювання, що сприяє зниженню деформацій, підвищенню міцності й ударної в'язкості з'єднань (рис. 39).

Зниження надійності систем магістральних трубопроводів у процесі їх тривалої експлуатації може пояснюватися старінням матеріалу,

накопиченням корозійно-ерозійних, втомних ушкоджень, розвитком технологічних й експлуатаційних дефектів.



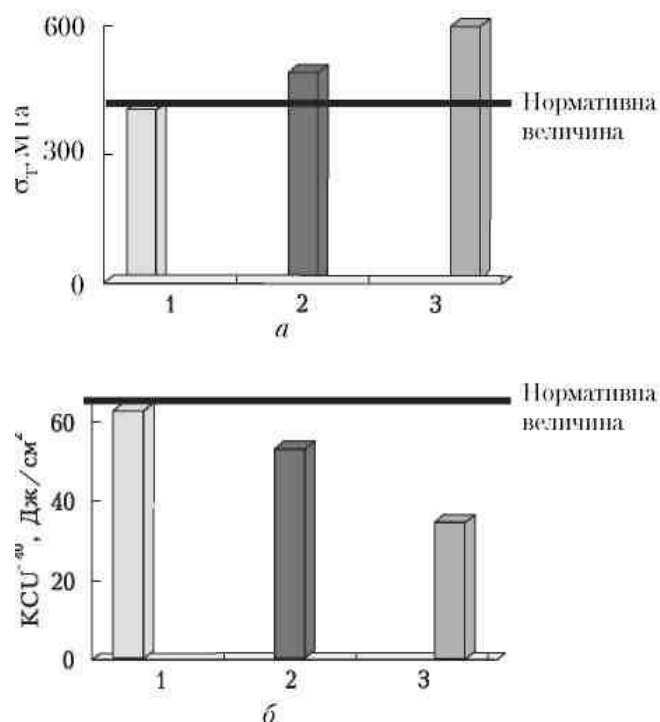
а — схеми орбітального зварювання; б — макроструктура шва, отриманого однопрохідним лазерним зварюванням; в — макроструктура шва, утвореного чотирьохпрохідним лазерно-дуговим зварюванням

Рисунок 39 – Лазерне зварювання кільцевих швів магістральних трубопроводів:

Однією з важливих причин передчасного вичерпування несучої здатності трубопроводів за високих тиску, температури і швидкості є зношення внутрішньої поверхні під впливом механічних й електрохімічних процесів. За результатами досліджень розроблено принципово новий підхід до оцінки міцності ділянок трубопроводів з такими ушкодженнями. Він базується на теоретичній та експериментальній залежності, що характеризують розміри глибини і довжини зони ушкодження, за яких забезпечується розрахункова міцність трубопроводів. Побудовані діаграми

дають змогу визначати граничні розміри зони корозійних ушкоджень на внутрішній поверхні труби.

Щодо забезпечення надійності магістральних трубопровідних систем транспорту нафти і газу здійснено комплексні дослідження властивостей основного металу і зварних з'єднань після тривалих термінів експлуатаційного навантаження. Доведено, що для низьколегованих трубних сталей тривала експлуатація практично не спричинює зміну властивостей матеріалу. Разом із тим деформаційне старіння трубних сталей може значно погіршити службові характеристики металу трубопроводів і в'язкості металу під час його зміцнення (рис. 40).



а — зміна межі текучості; *б* — зміна ударної в'язкості; 1 — резервна труба; 2 — після експлуатації протягом 40 років; 3 — внаслідок штучного старіння

Рисунок 40 – Стан металу трубопроводів

Проте, як свідчать результати досліджень, за експлуатації трубопроводу приблизно 40 років негативних наслідків деформаційного старіння слід очікувати здебільшого на ділянках холодної деформації труб і в зонах дефектів. Перетворення через деформаційне старіння трубної сталі на міцніший матеріал зі зниженими пластичністю і в'язкістю стимулює

розробку труб з особливими технічними характеристиками для окремих ділянок магістральних трубопроводів.

На зміну властивостей металу істотно впливає пластична деформація. Вона може виникати в зонах конструктивних концентраторів напружень (місця зварювання трийників, відведень), різного роду дефектів, змін геометрії труби. В'язкість руйнування трубних сталей після пластичної деформації істотно зменшується. Найнижчі значення в'язкості руйнування зафіксовані на зразках, що імітують точкові механічні ушкодження металу труб — вм'ятини з неглибокими поверхневими надривами. Підтримувати працездатність трубопроводних систем найраціональніше за допомогою визначення поточного технічного стану їхніх елементів засобами технічної діагностики, з подальшою заміною компонентів, які не відповідають заданому рівню надійності. З цією метою академічними інститутами електрозварювання та проблем міцності спільно з низкою організацій нафтогазового комплексу країни розроблено типову методику комплексного обстеження і діагностики лінійної частини магістральних трубопроводів.

Вона ґрунтується на нових інформаційних технологіях. Основними елементами цієї методики є:

- підготовка та аналіз початкових властивостей і формування банку даних;
- обстеження трубопроводу із залученням сучасних методів діагностики;
- оцінка міцності і залишкового ресурсу трубопроводу;
- ранжирування дефектних ділянок за ступенем їх небезпечності і розробка рекомендацій з методів та черговості виконання ремонтних робіт.

Враховуючи тривалий термін експлуатації головних систем магістральних газонафтопроводів, обсяги їхньої діагностики й оцінки технічного стану, зокрема із залученням розроблених методичних підходів, слід істотно збільшити.

Створена електрохімічна мікропроцесорна система корозійного моніторингу магістральних трубопроводів, яка дає змогу визначати електрохімічний потенціал трубопроводу, місця ушкодження захисного

покриття, швидкість корозії металу труби в зоні дефектів захисного покриття. Така система застосовувалася для обстеження магістральних газопроводів «Уренгой—Помари—Ужгород», «Прогрес», «Союз».

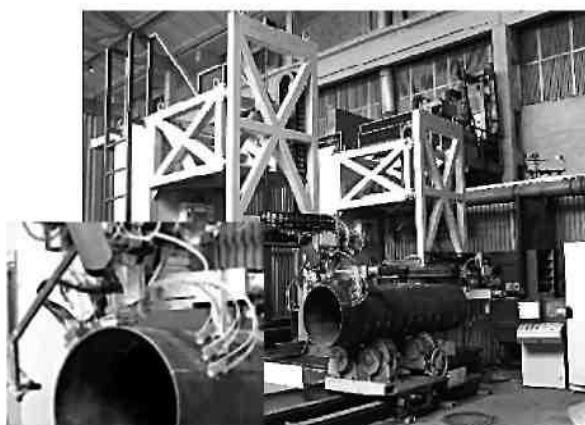
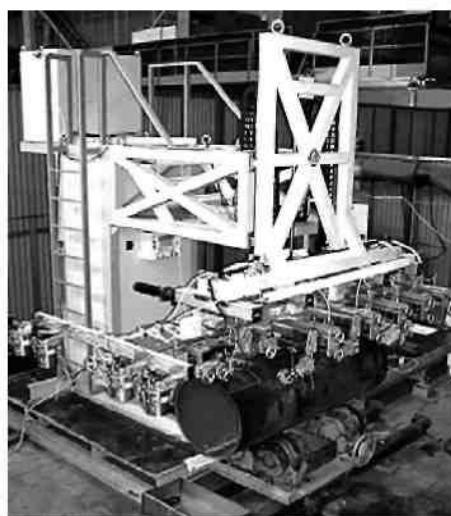
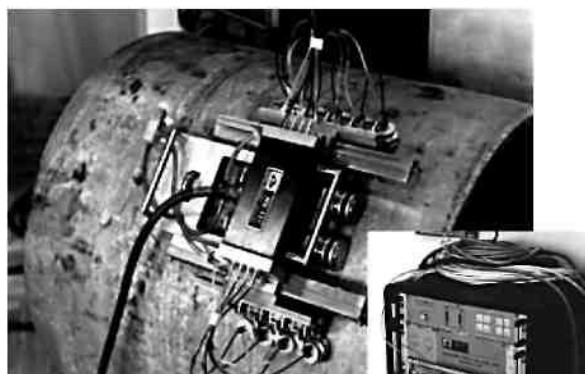
Корозійний моніторинг за допомогою електрохімічної мікропроцесорної системи на небезпечних ділянках газопроводів дозволяє оцінювати технічний стан металу труби під захисним покриттям і прогнозувати залишковий ресурс трубопроводів. Підвищення їх надійності і довговічності тісно пов'язане з удосконаленням методів та засобів неруйнівного контролю якості.

Створено нове покоління автоматизованих *ультразвукових* установок для контролю різних типів зварних труб нафтового і газового сортаменту. Як приклад на *рис. 41, а* показано установку для автоматизованого ультразвукового контролю кінцевих ділянок труб діаметром до 1420 мм і товщиною стінки 7—50 мм. Вона призначена для прозвучування по периметру кінців труб за всією товщиною стінки і дає змогу виявляти дефекти таких типів: на зразок розшарування і поздовжньо орієнтовані тріщини.

Розроблена установка для автоматизованого ультразвукового контролю поздовжніх зварних швів труб з такими самими діаметрами і товщиною стінки (*рис. 41, б*). Вона призначена для прозвучування зварного шва з обох боків за всією товщиною стінки труби і допомагає виявляти різноорієнтовані дефекти, як-от тріщини, пори, шлакові включення, непровари за умов масового виробництва труб. Установка забезпечена системою лазерного стеження за валиком посилення зварного шва у комплексі з промисловим комп'ютером.

Науковці ІЕЗ створили установку для автоматизованого ультразвукового контролю кільцевих зварних з'єднань трубопроводів (*рис. 41, в*). З її допомогою виявляють у шві та біляшовній зоні несучільності (пори, шлакові включення, непровари, тріщини). Це дає змогу визначати їхні відносні розміри і координати місця розташування з отриманням документа контролю у вигляді протоколу.

Усі розроблені автоматизовані системи ультразвукового контролю успішно використовуються у промисловості.

*a**б*

a – НК362 для торців труб; б – НК360 для поздовжнього зварного шва труб Ж508-1420 мм з товщиною стінки 7...50 мм; в – НК321 для кільцевих зварних швів труб

Рисунок 41 – Нове покоління автоматизованих установок для ультразвукового контролю якості зварних труб

Дослідницькі колективи виконують комплекс робіт з удосконалення систем ультразвукового неруйнівного контролю магістральних трубопроводів у польових умовах. Однією з проблем достовірності такого контролю є забезпечення акустичного контакту ультразвукових перетворювачів з контрольованою поверхнею. Акустичний сигнал, дискретний або втрачений, зводить нанівець результати контролю.

Розроблено електромагнітоакустичний метод ультразвукового контролю, де ультразвукові хвилі у металі збуджуються за допомогою перетворювача, що не потребує контактної рідини. Метод не критичний до якості поверхні труби і форми валика посилення шва. Він дає змогу здійснювати контроль і за наявності на поверхні ізоляції завтовшки до кількох міліметрів. Електромагнітоакустичний дефектоскоп успішно пройшов промислові випробування. Сканування перетворювача поверхнею труби і введення ультразвукових хвиль у різних напрямках забезпечує ідентифікацію типу та розміру дефектів у зварних з'єднаннях і матеріалі труби.

Є багато протяжних, закритих трубопроводів, вивчення корозійних ушкоджень яких утруднено через неприступність до ділянок контролю. Це підземні трубопроводи, що проходять під автомобільними і залізничними магістралями, галереї трубних переходів тощо. З цією метою розроблені технологія і засоби хвилеводного низькочастотного ультразвукового контролю протяжних об'єктів під час їхньої експлуатації. На відміну від звичайного УЗК, що використовує випромінювання високої частоти — МГц, новий метод базується на застосуванні низькочастотного випромінювання у діапазоні 20–200 кГц, що дає змогу знаходити корозійні ушкодження металу, віддалені більш як на 50 м від ділянки, де розміщені ультразвукові перетворювачі. Дослідні зразки таких приладів підтвердили ефективність низькочастотної системи ультразвукового контролю у важкодоступних місцях.

Великі можливості для діагностики дає метод *акустичної емісії*. Розроблені спеціалізовані методики й обладнання на основі його

використання. Портативна апаратура дозволяє здійснювати надійний контроль технічного стану трубопроводів, судин під тиском й інших конструкцій (рис. 42).



Рисунок 42 – Акустоемісійний контроль трубопроводів

Науковці академічних інститутів здійснили широкі дослідження, пов'язані з процесом розпізнавання й аналізу сигналів, що виникають під час деформації та руйнування конструкційних матеріалів. Оскільки руйнування відбувається дискретно, то кожен його етап супроводжується випромінюванням також дискретного характеру.

Імпульси випромінювання несуть інформацію про характер і небезпечність процесу, при цьому здійснюється локація ослаблених зон на ранніх стадіях руйнування. Зіставлення сигналів акустичної емісії з реальними дефектами підтверджує високу достовірність отримуваної інформації.

Акустоемісійним методом уже продіагностовано близько тисячі різних об'єктів. Його перевагою є можливість здійснення стовідсоткового контролю протяжних конструкцій порівняно невеликою кількістю датчиків і визначення небезпечних ситуацій на ранніх стадіях їх появи.

Ця перевага акустоемісійного методу дала змогу створити системи безперервного моніторингу технічного стану об'єктів з підвищеними вимогами до безпечності їхньої експлуатації. Так, розроблені технологія і обладнання застосовані для неперервного моніторингу труби аміакопроводу, що проходить по мосту через Дніпро в районі м. Дніпро. Контролюється 1 км труби датчиками, розташованими на лівому і правому берегах річки по обидва боки мостового прольоту.

Систему акустоемісійної діагностики встановлено на Одеському припортовому заводі. Протягом 15 років вона має забезпечувати неперервний контроль стану ізотермічного сховища аміаку, поверхня якого — 3,5 тис. м². Розміри сховища відображено на рисунку. У нижній його частині показано апаратуру контролю, розміщену безпосередньо біля корпусу сховища; пульт контролю і керування експлуатацією розташований у диспетчерській заводу. Інформація про стан сховища аміаку Інтернетом передається і на київський монітор. Тому в Києві можна у будь-який момент спостерігати й аналізувати всі процеси, що відбуваються у сховищі.

Слід зазначити, що перспективними також є магнітні методи діагностики зварних з'єднань у процесі експлуатації трубопроводів. Уже отримані відомості про чутливість магнітних характеристик до накопичення втомних ушкоджень у конструкційних матеріалах. На *рис. 43* показано зміну величини коерцитивної сили трубної сталі під час циклічних випробувань зразків на розтягування. Спостерігаються порогові значення коерцитивної

сили, яка характеризує несучу здатність металу. Необхідні цілеспрямовані дослідження в цій ділянці, що допоможе створити ефективний метод оцінки ресурсу зварних конструкцій.

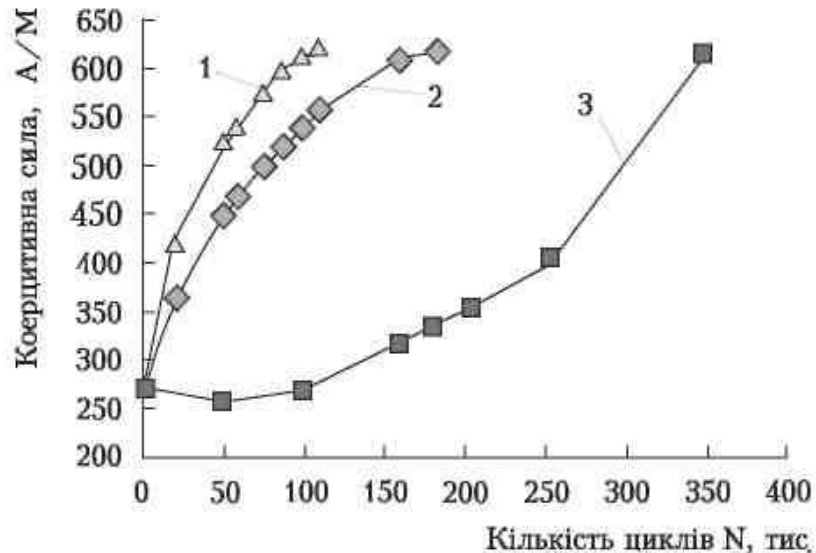
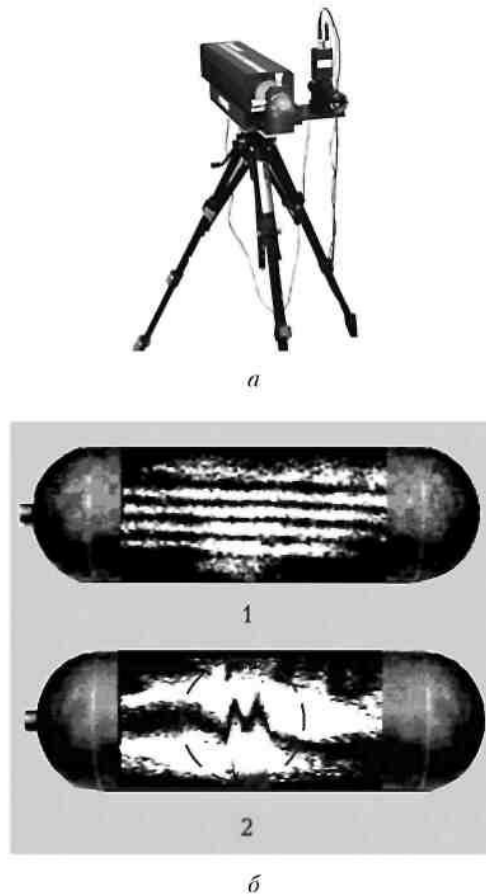


Рисунок 43 – Залежність величини коерцитивної сили сталі 10Г2С1 від кількості циклів й амплітуди напружень σ_a під час циклічного навантаження, кг/мм^2 : 1 — 39; 2 — 34; 3 — 29

Науковці ІЕЗ розробили методи лазерної інтерферометрії для визначення напружено-деформованих станів і контролю якості зварних з'єднань та конструкцій. Широкі можливості в цьому плані надає метод ширографії, заснований на електронній обробці оптичної інформації. Його важливою перевагою є без-контактність вимірювань і можливість спостереження в реальному масштабі часу картин інтерференційних смуг, що характеризують похідні від мікропереміщень поверхні під впливом заданого навантаження. Як показано на *рис. 44*, методом електронної ширографії ефективно здійснюють неруйнівний контроль якості зварних балонів для стисненого газу, що слугує паливом для двигунів внутрішнього згорання на автотранспорті.

В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона здійснено великий комплекс наукових досліджень зі створення легких металопластикових балонів для транспортних засобів, які використовують стиснений до 20 МПа природний газ метан як паливо.



а — компактне обладнання; б — картини інтерференційних смуг; 1 — балон без дефектів; 2 — балон з тріщиною у поздовжньому зварному шві

Рисунок 44 – Неруйнівний контроль якості зварних балонів методом електронної ширографії

Обґрунтовано можливість заміни дефіцитних трубних заготовок на зварний варіант металевого корпусу, який виготовляється з високоміцної листової сталі. При цьому вальцьована пря-мошовна обичайка з'єднується кільцевими швами зі штампованими напівсферичними денцями. Найбільш навантажена циліндрова частина корпусу балона зміцнюється додатковою обробкою поздовжнього шва і композиційною оболонкою зі скловолокна чи інших волокон високої міцності. Це дало змогу виготовляти комбіновані балони з масо-габаритним показником 0,6 кг/л. За довговічністю (понад 24 тис. циклів навантаження) і більш як триразовим запасом міцності вони не поступаються кращим світовим зразкам. Фахівці ІЕЗ створили ефективні технології ремонту трубопроводів і приєднання до них відведень під тиском із застосуванням дугового зварювання, що дає змогу скоротити втрати

енергоресурсів, забезпечити безперебійну роботу трубопровідного транспорту і вберегти навколишнє середовище від забруднення за високого рівня безпечності зварювальних робіт і надійності зварних з'єднань. Розроблені технології охоплюють широкий спектр методів ремонту дефектних ділянок лінійної частини трубопроводів в умовах експлуатації і дають можливість:

- відновлювати несучу здатність трубопроводів з корозійно-механічними ушкодженнями;
- посилювати дефектні зварні стики;
- заплавляти корозійні виразки і раковини;
- герметизувати наскрізні дефекти у стінці труби;
- приєднувати відведення у разі підключення споживачів до основної магістралі

Для кожного технологічного процесу визначено безпечні умови виконання зварювальних робіт, забезпечення якості і надійності зварних з'єднань за робочих навантажень. Встановлено залежності безпечного тиску у трубопроводах від товщини стінки труби в місці зварювання, величини зварювального струму і швидкості транспортування нафти й газу.

Науковці ІЕЗ ім. Є.О. Патона запропонували нові конструктивно-технологічні схеми посилення схильних до корозії ділянок герметичною муфтою і дефектних зварних стиків трубопроводів двохшаровою муфтою. Тому механічні властивості зварних з'єднань відповідають нормативним вимогам. Доведено, що перехід від з'єднань з кутовим швом до нахльосточно-стикових підвищує довговічність і межу витривалості зварних з'єднань за циклічного і повторно-статичного навантажень.

Із застосуванням цих технологій на об'єктах компанії «Укртрансгаз» відремонтовано близько ста дефектних кільцевих стиків, виконано десятки врізів відведень у діючі газопроводи під тиском і відновлено працездатність великої кількості ділянок з поверхневими корозійними ушкодженнями та корозійними виразками (рис.45).

*a**б**в*

Рисунок 45 – Упровадження ремонтних технологій на об'єктах «Укртрансгазу»: а — двошарова муфта; б — врізка відводу в газопровід під тиском; в — компанундна муфта

Складна проблема оперативного ремонту діючих трубопроводів є особливо гострою за умов переходу через водні перешкоди. Для розв'язання цієї проблеми в ІЕЗ створено технологію ремонту магістральних трубопроводів

на підводних ділянках, яка базується на застосуванні дугового зварювання безпосередньо у воді. Технологія гарантує безпечність виконання робіт на діючому трубопроводі і достатню якість з'єднань у місцях відновлення.

В Інституті електрозварювання створено спеціалізоване обладнання і гаму електродних матеріалів, призначених для зварювання труб з маловуглецевих і низьколегованих сталей з межею плинності до 490 МПа. Зварювання виконується на глибинах до 20 м. Поверхневі пошкодження ремонтують без вирізання дефектних місць за внутрішнього тиску у трубопроводі до 2,5 МПа. З використанням технології підводного зварювання відремонтовано понад 70 нафто- і газогонів з діаметром до 1020 мм.

Сьогодні гостро актуальними стали проблеми зниження будь-яких видів втрат і підвищення ефективності роботи транспортних енергетичних систем. Так, газотурбінні установки потужністю 16 МВт, що діють на газоперекачувальних станціях для приводу нагнітачів природного газу, викидають в атмосферу теплову енергію, еквівалентну 60—70% усієї споживаної. Коефіцієнт корисної дії таких установок не перевищує 32%. Цю енергію доцільно використовувати для додаткового виробництва електроенергії, що йде на власні потреби і потреби підприємств чи житлових масивів, розміщених поблизу компресорних станцій. За оцінками експертів «Укртрансгазу», сумарна додаткова електрична потужність, яку можна отримати від утилізації теплової енергії, що виділяється газокompресорними агрегатами України, сягає 1,5 млн кВт. Інший ефективний шлях — це вироблення на компресорних станціях холоду за допомогою установок, які утилізували тепло газотурбінних двигунів. Використання таких установок для охолодження транспортованого газу допоможе приблизно на 8–10% підвищити продуктивність магістральних трубопроводів.

Утилізація теплових вторинних ресурсів на газокompресорних станціях потрібна також для дотримання екологічних вимог, що висуваються до великих енергетичних об'єктів згідно з Кіотським протоколом.

Контрольні питання до теми 3

1. Які плазмотрони застосовують у зварювальній практиці? Дайте характеристику кожному типу.
2. У чому технічна суть найпоширеніших способів зварювання плазмовою дугою?
3. Як відрізняються існуючі плазмоутворювальні сопла?
4. Які переваги має плазмове зварювання у порівнянні з аргонодуговим?
5. Як класифікуються способи плазмового наплавлення?
6. У чому полягають переваги плазмового наплавлення по нерухомій присадці, плазмово-порошкового наплавлення?
7. На яких принципах ґрунтується схема плазмового напилення?
8. Які лазери є найдоцільніші для реалізації термічного різання, зварювання, поверхневої обробки?
9. Від яких характеристик матеріалу деталі залежить ефективність лазерної обробки?
10. Наведіть способи та прийоми підвищення ефективності лазерного зварювання
11. Чим спричинене застосування флюсів при лазерному зварюванні?
12. Поясніть принципи та переваги гібридного лазерно-дугового зварювання.
13. У чому перспективність інерційного та роликового зварювання тертям?
14. Які технічні можливості має зварювання тертям з перемішуванням?
15. Які основні параметри процесу зварювання тертям з перемішуванням?
16. Які різновиди зварювання тертям термопластів знаходять найбільше застосування?
17. Охарактеризуйте спосіб наплавлення тертям. У чому перспективність такої обробки?

Список рекомендованої літератури

1. Лашенко Г.И. Современные технологии сварочного производства.- К.: „Екотехнологія”, 2012.- 720 с.
2. Квасницький В.В. Спеціальні способи зварювання: Навч. посібник.- Миколаїв: УДМТУ, 2003.- 437 с.
3. Кучук-Яценко С.І., Лобанов Л.М. Інноваційні технології зварювання та діагностики транспортних енергетичних систем // Вісн. НАН України, 2006. – №2. – С.41-51.
4. Ришов Р.М., Кузнецов В.Д. Магнітне керування якістю зварних з'єднань. – К.: „Екотехнологія”, 2010. – 288 с.
5. Биковський О.Г. Зварювання та різання кольорових металів: Довідковий посібник. – К.: Основа, 2011. – 392 с.
6. Рябцев И.А., Сенченков И.К. Теория и практика наплавочных работ. – К.: „Екотехнологія”, 2013. – 400 с.
7. Кайдалов А.А. Современные технологии термической и дистанционной резки конструкционных материалов. – К.: „Екотехнологія”, 2007. – 456 с.
8. Гладкий П.В., Переpletчиков Е.Ф., Рябцев И.А. Плазменная наплавка. – К.: „Екотехнологія”, 2007. – 292 с.
9. Лебедев Б.Д., Перемитько В.В. Расчетные методы в сварке плавлением: Учеб.пособие.- Днепродзержинск: Изд-во ДДТУ, 1998.- 285 с.

Навчальне видання

Конспект лекцій з дисципліни «Інноваційні процеси у зварюванні та споріднених технологіях» для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня спеціальності 131 Прикладна механіка освітньої програми «Технології та устаткування зварювання» усіх форм навчання

Укладач: ПЕРЕМІТЬКО Валерій Вікторович

Підписано до друку **19.04. 2018** р. Формат ___ А4 ___ др.арк.

Обсяг ___ **5,12** ___ др.арк. Наклад_ **25** ___ примірників

Замовлення № **777**

51918, вул.Дніпробудівська,2, м. Кам`янське

ДЛЯ ПОДАТОК

ДЛЯ ПОТАТОК

