

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ
з дисципліни
«ОБРОБКА ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ»
для студентів спеціальності
131 «Прикладна механіка»
освітньої програми
«Технології та устаткування зварювання»

Конспект лекцій з дисципліни «Обробка зварних з'єднань» для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньої програми «Технологія та устаткування зварювання» / Укл.: Р.А. Куликовський, О.Є. Капустян – Запоріжжя: ЗНТУ, 2016. – 78 с.

Укладачі: Р.А. Куликовський, канд. техн. наук, доцент,
О.Є. Капустян, ст. викл.

Рецензент: О.В. Овчинников, д-р техн. наук, професор

Редактор: І.П. Аверченко

Відповідальний за випуск О.Є. Капустян

Затверджено
на засіданні кафедри ОТЗВ
Протокол № 3
від 27.10.2016 р.

Рекомендовано до видання
НМК Інженерно-фізичного
факультету
Протокол № 3
від 15.11.2016 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 КЛАСИФІКАЦІЯ СПОСОБІВ ОБРОБКИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ	6
2 ТЕРМІЧНІ СПОСОБИ ОБРОБКИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ.....	10
2.1 Види та режими термічної обробки.....	10
2.2 Способи нагріву.....	22
2.3 Нагрівальні пристрої для термообробки.....	27
2.4 Аргонодугова обробка.....	33
3 ДЕФОРМАЦІЙНА ОБРОБКА ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ	37
3.1 Ультразвукова обробка	37
3.1.1 Сутність та схема ультразвукової обробки	37
3.1.2 Призначення ультразвукової обробки.....	40
3.1.3 Устаткування для ультразвукової ударної обробки.....	41
3.2 Проковка ударниковим інструментом.....	45
3.2.1 Сутність, призначення та особливості застосування	45
3.2.2 Технологічні особливості	47
3.2.3 Устаткування.....	49
3.3 Обкатка.....	50
3.4 Дробоструминний наклеп.....	52
3.4.1 Сутність та призначення	52
3.4.2 Устаткування.....	54
4 ІМПУЛЬСНІ ТА ВІБРАЦІЙНІ СПОСОБИ ОБРОБКИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ	56
4.1 Вібраційна обробка.....	56
4.1.1 Фізична сутність та призначення	56
4.1.2 Схеми вібраційної обробки.....	58
4.1.3 Вибір режимів віброобробки зварних конструкцій.....	59
4.1.4 Устаткування для віброобробки.....	62
4.2 Імпульсна обробка.....	66

5 КОМБІНОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ	67
5.1 Спільне вібраційне і статичне навантаження	68
5.2 Вібронавантаження з нагрівом	70
5.3 Аргонодугова обробка і подальший поверхневий наклеп	72
6 СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ОБРОБКИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ	73
7 МЕХАНІЧНА ОБРОБКА ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ	74
7.1 Призначення та галузь застосування	74
7.2 Основні технологічні вимоги до механічної обробки	75
7.3 Контроль якості механічної обробки	76
7.4 Устаткування та інструмент	77
ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	78

ВСТУП

Термодеформаційний цикл зварювання пов'язаний з одночасною дією ряду негативних чинників, що комплексно впливають на якість та довговічність конструкцій:

- наявність високих залишкових напружень (внаслідок нерівного місцевого нагріву металу зон з'єднання концентрованим джерелом теплоти), які в деяких випадках досягають значень близьких до межі текучості металу (250...350 МПа) і викликають місцеві деформації та зміни геометричних розмірів зварної конструкції;

- незадовільні механічні властивості зони термічного впливу та шву метала (внаслідок утворення неоднорідних властивостей металу, появи крихких та низькоміцних прошарків металу, насичення металу шва воднем та інші), що призводить до виникнення тріщин;

- наявність концентраторів напружень внаслідок конструктивних (незадовільна форма зварного виробу) або технологічних дефектів (тріщини, жухелеві вкраплення, пори, підрізи та інше).

Зміни геометричних розмірів зварних конструкцій також інтенсифікуються під дією монтажних, транспортних та експлуатаційних навантажень, а також з підвищенням температури.

Всі ці чинники, а також інші недоліки впливу технологічних особливостей процесу зварювання на з'єднання матеріалів негативно впливають на точність, корозійну стійкість, крихку міцність, динамічну витривалість, жаростійкість, корозійну стійкість та експлуатаційну надійність конструкцій.

Практика зварювального виробництва налічує ряд технологій, які здатні мінімізувати або взагалі усунути негативний вплив термодеформаційного циклу зварювання на зварну конструкцію.

В конспекті лекцій кратко наведено відомості про класифікацію, галузі застосування, сутність та особливості основних технологій обробки зварних конструкцій направлених на підвищення їхньої працездатності та експлуатаційної надійності.

Метою вивчення дисципліни є отримання студентом знань та навичок для обґрунтованого застосування існуючих способів обробки зварних з'єднань при розробці технологічних процесів виготовлення зварних конструкцій.

1 КЛАСИФІКАЦІЯ СПОСОБІВ ОБРОБКИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

Всі відомі способи обробки зварних з'єднань умовно поділяють на шість основних груп: термічні, механічні, деформаційні, імпульсні й вібраційні, спеціальні та комбіновані (рис. 1.1).

Термічні способи обробки за температурою нагріву із заданою швидкістю, часом витримки та швидкістю охолодження поділяють на: відпускання, нормалізацію, термічний відпочинок, аустенізацію, відновлювальну термообробку та відпал.

Відпускання застосовують для зменшення залишкових напружень та забезпечення стабільності геометричних розмірів, підвищення опору втомлюваності та стійкості проти крихких руйнувань, поліпшення корозійної стійкості.

За способом застосування до виробу термічна обробка поділяється на загальну, місцеву або точкову. Найбільш поширеною є загальна термообробка, водночас місцевий нагрів застосовують при виготовленні великогабаритних зварних конструкцій. Також місцевий та точковий нагрів зварних з'єднань застосовують з метою створення стискаючих напружень в ділянках концентраторів залишкових розтяжних напружень.

До термічних способів також відносять плазмову та аргонодугову обробку зварних з'єднань, які створюють плавний перехід шва до основного метала шляхом оплавлення границь шва плазмовою дугою або дугою вольфрамового електроду, що не плавиться.

Механічні способи зазвичай складаються з обробки опуклості (підсилення) зварних стикових з'єднань фрезами та абразивними шліфувальними кругами. Обробка здійснюється для усунення концентраторів напружень, що сприятливо впливає на стійкість проти крихких руйнувань та збільшує межу витривалості при динамічних навантаженнях.

Спеціальні способи обробки призначаються для зменшення концентрацій напружень та захисту поверхні металу від дії агресивних середовищ шляхом нанесення на зварні з'єднання або конструкції полімерних та металевих покриттів.



Рисунок 1.1 – Класифікація способів обробки зварних з'єднань

Імпульсні та вібраційні способи складаються з вибухової, електрогідроімпульсної, магнітно-імпульсної та вібраційної обробки зварних з'єднань.

Вибухова обробка істотно поліпшує опір утомленості зварних з'єднань.

При електрогідроімпульсній обробці високі тиски на зварне з'єднання досягаються високовольтним електричним розрядом в рідині, який отримують шляхом миттєвого підключення до робочих електродів зарядженої конденсаторної батареї.

Магнітно-імпульсна обробка здійснюється за рахунок співударання електропровідної пластини та зварного з'єднання. Пластина набуває прискорення внаслідок взаємодії електромагнітних сил відштовхування між провідником зі струмом та індуктором магнітного поля.

На відміну від вибухової обробки процеси електрогідроімпульсної та магнітно-імпульсної обробок легко регулюються в широкому діапазоні, характеризуються високою стабільністю відтворення режимів, не потребують особливих заходів безпеки необхідних при застосуванні бризантних вибухових речовин. Проте ці способи мають менші енергетичні можливості на відміну від обробки вибухом, та потребують більш складне обладнання.

Вібраційна обробка застосовується для стабілізації геометричних розмірів зварних конструкцій шляхом збуджування в них низькочастотних механічних коливань.

Деформаційні способи здійснюють пластичну деформацію різних зон зварних з'єднань за рахунок введення механічної енергії шляхом: обкатки зварних з'єднань, місцевого пластичного деформування, наклепу одно- та багатоударниковим інструментом або попереднього перевантаження зварних конструкцій.

Обкатка зони зварних з'єднань роликками зменшує напруження розтягу, а при значних тисках може створити напруження стиску до величини, близької до межі текучості металу. Обкатка з малими ступенями деформації є не що інше, як засіб створення наклепу в поверхневих шарах металу, зокрема на поверхнях зварного шва або колошовної зони.

Прокатку і обкатку використовують для підвищення втомної міцності і розмірної стабільності зварних з'єднань тонколистових металоконструкцій.

Місцеве пластичне деформування (місцеве обтиснення) полягає в стисканні металу, що знаходиться біля концентратора напружень, між круглими штампами до такої міри, щоб відбулася загальна плинність матеріалу між штампами. При цьому виникають залишкові стискаючі напруження.

Подібно обкатці наклеп в поверхневих шарах металу створюють за допомогою одно- і багатоударникових інструментів, дробу і ультразвукового ударника. При цьому позитивний ефект досягається за рахунок зниження розтягуючих напружень та утворення в ряді випадків в поверхневих шарах корисних залишкових напружень стиску, зниження концентрації напружень й прояві ефекту деформаційного зміцнення.

При попередньому перевантаженні зварних конструкцій елемент з концентратором напружень навантажують до появи текучості в надрізі. При знятті навантаження в зоні надрізу виникають залишкові напруги протилежного знаку, тобто перевантаження при розтягуванні викликає в надрізі залишкові напруги стискання, які сприяють підвищенню опору втомі. Однак при перевантаженні зварної конструкції можна досягти напружень, рівних границі текучості в усіх вузлах. Крім того, таке перевантаження може призвести до зменшення здатності до пластичної деформації зварних з'єднань в процесі експлуатації.

Комбіновані способи обробки зварних з'єднань базуються на принципах інтеграції окремих способів обробки та можуть здійснюватися послідовно, паралельно (одночасно) або послідовно-одночасно на одному робочому місці. Основним критерієм для їх призначення є необхідність підвищення технологічної та економічної ефективності процесу обробки зварних з'єднань в порівнянні з основними способами.

2 ТЕРМІЧНІ СПОСОБИ ОБРОБКИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

2.1 Види та режими термічної обробки

Одним з основних засобів підвищення надійності зварних з'єднань є термічна обробка, в результаті якої знижується рівень зварювальних напружень, поліпшується структура і властивості металу з'єднання, знижується вміст водню.

Термообробку поділяють на загальну, місцеву, поетапну і поелементну. При загальній термообробці рівномірно нагрівають виріб цілком за один цикл. У разі місцевої термообробки нагріванню піддають зварний шов, ЗТВ і ділянки основного металу, що примикають до зварного шва з двох сторін. Поетапна термообробка передбачає послідовний нагрів ділянок конструкції шляхом переміщення джерела нагріву уздовж її осі. При поелементній термічній обробці нагріванню піддають вузли зварної конструкції, а потім зварюють їх між собою.

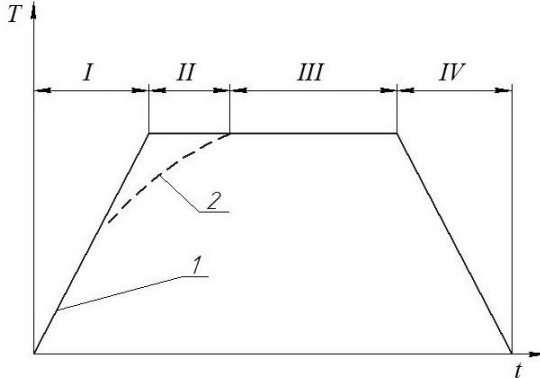
Крім того, термообробку поділяють на *проміжну* і *остаточну*. Проміжну термообробку проводять для зварювання з'єднань з не повністю виконаним зварним швом або для повністю виконаних зварних з'єднань, якщо вони в подальшому підлягають повторній термообробці.

Термообробку зазвичай призначають для зварних з'єднань з перлітних сталей, що гартуються типу ХМФ або ХМ (12Х1МФ, 15Х5М та ін.). Рідше термообробку застосовують для зварних з'єднань з перлітних низьковуглецевих сталей типу сталь 20 і низьколегованої типу 09Г2С для зниження рівня зварювальних напружень в тому випадку, якщо ці стали працюють в контакт з корозійнонебезпечними середовищами. Як правило, кожна галузь промисловості має свої нормативні документи по термообробці зварних з'єднань, які відображають особливості даного виробництва.

Процес термообробки складається з чотирьох послідовних етапів: нагрівання до певної температури із заданою швидкістю, вирівнювання температури, витримки при цій температурі протягом певного часу і подальше охолодження із заданою швидкістю або під шаром теплоізоляції (рис. 2.1).

Для виключення викривлення конструкції на стадії нагріву при

загальній термічній обробці температура печі при посадці в неї виробу, як правило, не повинна перевищувати 300...400 °С. Більш високу температуру печі при посадці допускають лише як виняток, якщо деталі мають просту конструкцію і не схильні до викривлення.



I - нагрів; II - вирівнювання; III - витримка; IV - охолодження

1 - поверхня виробу; 2 - внутрішні зони

Рисунок 2.1 - Зміна температури при різних стадіях термообробки

Час нагріву конструкції в печі практично не впливає на релаксацію напружень. Тому перевагу слід віддавати форсованому нагріву в межах, що не викликають небезпеку деформування конструкції на цій стадії.

Можливість деформування конструкції при відпустці слід враховувати ще на стадії конструктивно-технологічного проектування, коли можна відмовитися від різкого перепаду перетинів, використання елементів з великою різницею по товщині і асиметричного їх розташування.

У тих випадках, коли небезпека викривлення і утворення тріщин в процесі нагрівання металоконструкцій відсутня, швидкість нагріву на початковому етапі (до 300...400 °С) може досягати 80 °С/год.

Швидкість нагріву вище 300...400 °С залежить від хімічного складу сталі, товщини стінок металоконструкції і способу зварювання. Зазвичай на практиці швидкість нагріву V лінійно пов'язують з товщиною стінки:

$$V = 200 (25/S), \text{ } ^\circ\text{C/год},$$

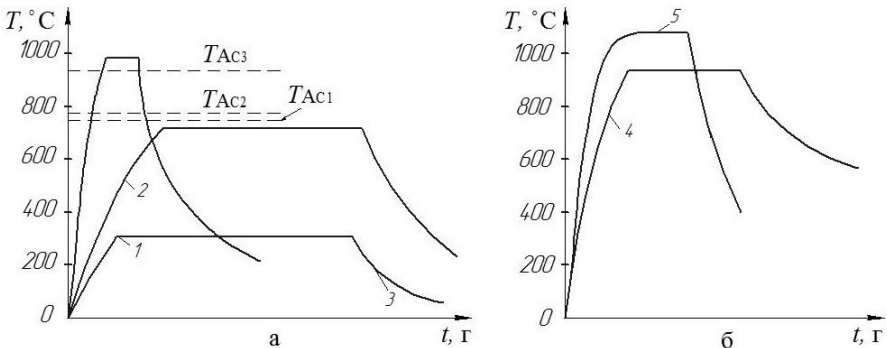
де S - товщина стінки, мм.

При цьому максимальна швидкість нагріву при спільній термообробці складає $200...250\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$, а мінімальна – $38...55\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$.

Необхідність регламентації мінімальних швидкостей нагріву викликана, перш за все, наявністю в ряді сталей аустенітно-феритних, феритних, аустенітних критичних інтервалів температур, в яких протікають певні структурні процеси (крихкість при $475\text{ }^{\circ}\text{C}$, σ -окрихчування, дисперсійне твердіння). Так, ефект твердіння пришовної зони теплотривких хромомолібденових сталей помітно посилюється при нагріванні зі швидкостями нижче $50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Рекомендовані значення швидкості нагріву зварних з'єднань цих сталей в інтервалі $500...700\text{ }^{\circ}\text{C}$ складають не менше $100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Для зварних з'єднань аустенітних хромонікелевих стабілізованих сталей рекомендують мінімальну швидкість нагріву в інтервалі $600...800\text{ }^{\circ}\text{C}$ не менше $120\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$.

Тривалість стадії вирівнювання температури по перетину металу конструкції залежить від конструкції печі, умов нагрівання, товщини елементів, що нагріваються і теплофізичних властивостей металу.

Застосовують наступні види термообробки зварних з'єднань (рис. 2.2): відпускання; нормалізацію; термічний відпочинок; стабілізуючий відпал; аустенізацію; відновну термообробку (нормалізація + високе відпускання); відпал для зварних з'єднань чавунних трубних елементів.



1 - термічний відпочинок; 2 – високе відпускання; 3 - нормалізація; 4 - стабілізуючий відпал; 5 - аустенізація; $T(A_{C1})$, $T(A_{C3})$ - температури критичних точок структурних змін A_{C1} і A_{C3} , $T(A_{C2})$ - точка Кюрі значного зниження магнітних властивостей

Рисунок 2.2 - Графік термообробки зварних з'єднань із сталі 12X1МФ (а) і хромонікелевої (нержавіючої) сталі 12X18Н9Т (б)

Відпускання призначають в наступних випадках:

- механічні властивості металу зварного з'єднання потребують поліпшення за рахунок пом'якшення гартівних структур, прискорення розпаду аустеніту і зняття наклепу;

- зварна конструкція при перевезенні або експлуатації охолоджується до температур, при яких можливі крихкі руйнування металу;

- при наявності зварних з'єднань великої товщини, виконаних електрошлаковим зварюванням, з високими об'ємними напруженнями або значною накопиченою потенційною енергією;

- конструкції мають багаточислові зварні шви товщиною більше 140...150 мм, які не відчують в процесі зварювання кутових поворотів;

- при зварюванні і охолодженні металоконструкцій виникли значні пластичні деформації;

- практикою експлуатації або спеціальними спостереженнями встановлено необхідність термообробки через появу холодних тріщин, корозійного розтріскування, нестабільності геометричних розмірів.

Відпускання є універсальним засобом обробки зварних з'єднань, коли одночасно з напругою першого роду знижуються напруги другого і третього роду.

Відпускання сталей в залежності від температури може бути: **низьке** (90...300 °С), **середнє** (300...450 °С) та **високе** (500...750 °С).

Низьке та **середнє відпускання** зазвичай застосовують для зварних вузлів з середньолегованих сталей з метою часткового відновлення властивостей зварних з'єднань при неможливості повної термічної обробки.

Високе відпускання дозволяє знімати залишкові напруги, покращувати структуру і властивості шва та зони термічного впливу, знімати наклеп, викликаний пластичними деформаціями при зварюванні й формоутворенні заготовок, а також усувати ефект деформаційного старіння.

До переваг високого відпускання також відносять:

- можливість зниження залишкових напружень до низьких значень, складових 10...20% вихідного рівня напружень;

- можливість поліпшення структури і властивостей металу з метою підвищення експлуатаційних характеристик конструкцій;

- можливість забезпечення стабільності форми та геометричних розмірів зварних конструкцій після механічної обробки і під дією експлуатаційних навантажень;

- більше підвищення опору крихким руйнуванням, корозії і втоми в порівнянні з іншими способами обробки зварних з'єднань.

При високому відпусканні зварне з'єднання нагрівають до температури на 20...30 °С нижче температури критичної точки A_{C1} , витримують протягом 1...5 год і потім повільно охолоджують. При цьому на 70...90% знижується рівень зварювальних напружень, відбуваються структурні зміни в зварному шві та ЗТВ. Для низьколегованих сталей ці зміни призводять до розпаду структур гартування, що в кінцевому підсумку призводить до помітного зниження твердості і підвищення пластичності металу. Високому відпусканню зазвичай піддають зварні з'єднання виробів сталей політнісного класу.

При проведенні високого відпускання велике значення має точність дотримання регламентованого режиму термообробки. Відхилення від заданого режиму може привести до істотного погіршення механічних і спеціальних властивостей зварного з'єднання.

Так, зниження температури нагріву для зварних з'єднань із сталі 12Х1МФ до 600...700 °С (замість 710...740 °С) призводить до окрихчування сталі, утворення тріщин, недостатнього зниження рівня зварювальних напружень (невідпускання), а підвищення температури до 760...800 °С пов'язане з небезпекою знеміцнювання (зниження тривалої міцності).

Оптимальна величина швидкості нагріву при високому відпусканні знаходиться в межах 100...400 °С і залежить від способу нагрівання, марки сталі і товщини стінки при термообробці виробів.

В окремих випадках, наприклад для зварних з'єднань труб з низьковуглецевих і кремнемарганцевих сталей при товщині стінки до 20 мм, допускається швидкість нагріву до 1000 °С/год (оптимізований режим термообробки). При цьому необхідно дотримуватися регламентованого часу витримки, тому що його скорочення не дозволяє знизити зварювальні напруження до необхідного мінімального рівня і закінчити процес структурних змін - розпад структур гартування в сталях типу ХМ і ХМФ (невідпускання).

Збільшення часу витримки може привести до знеміцнення зварного з'єднання. При збільшенні швидкості охолодження вище нормативного (зазвичай більше 400 °С/год) може відбутися зростання рівня температурних напружень, а для сталей типу ХМ і ХМФ сповільниться процес розпаду структур гартування.

Швидкість охолодження після відпускання вибирають з умови виключення нових залишкових напружень і поводок конструкції через різницю температур по перетину і довжині виробу. Максимальна швидкість охолодження регламентується в області температур вище 300...400 °С для перлітних сталей і вище 600 °С для аустенітних сталей, коли матеріал має порівняно низьку межу плинності. Для зварних конструкцій середньої складності (судини, трубопроводи та ін.) Максимальна швидкість охолодження в більшості випадків не перевищує 250 °С/год.

При температурах нижче 300...400 °С поява пластичних деформацій при охолодженні менш ймовірна і виріб зазвичай охолоджують поза печі, на спокійному повітрі.

Необхідно відзначити, що надмірно швидке охолодження після відпускання деяких сталей небажано не тільки через небезпеку викривлення конструкції. При швидкому охолодженні, починаючи з температур, при яких в цих сталях відбувається розчинення вторинних фаз, може бути зафіксований пересичений твердий розчин, що створює передумови для подальшого старіння і окрихчування в процесі експлуатації.

При термічній обробці виробів з низьколегованих хромистих, хромонікелевих, хромонікельмолібденованадієвих сталей (30ХНМ, 25ХМ, 40Х та ін.), схильних до оборотної відпускнуої крихкості, а також ряду високохромистих і аустенітних сталей, схильних до σ -окрихчуванню або 475 °С окрихчуванню, повинна обмежуватися і мінімальна швидкість охолодження в небезпечному інтервалі температур.

Для зварних з'єднань із сталей перлітного класу охолодження під шаром теплоізоляції допускається без регламентації швидкості охолодження (в цьому випадку вона не перевищує 400 °С/год).

Нормалізація. Застосовується для зварних з'єднань, виконаних методами зварювання з великою погонною енергією, при якій структура металу зварного з'єднання стає грубозернистою зі зниженими механічними властивостями.

Зварне з'єднання нагрівають до температури на 20...30 °С вище температури критичної точки A_{C3} , витримують протягом нетривалого часу і охолоджують на спокійному повітрі. Мета нормалізації - отримати однорідну дрібнозернисту структуру металу і поліпшити механічні властивості зварного з'єднання, а також знизити рівень зварювальних напружень. Нормалізації найчастіше піддають зварні з'єднання тонкостінних труб малого діаметра з низьколегованих сталей перлітного класу, зварені газовим зварюванням, які в початковому стані (після зварювання) мають грубозернисту структуру зі знизженими пластичними властивостями.

Нормалізації піддають також зварні з'єднання посудин тиску, виконані електрошлаковим зварюванням. Крім того, нормалізація є основним видом обробки при відновлювальній термообробці паропроводів зі сталі 12X1МФ.

Термічний відпочинок. Зварне з'єднання нагрівають до 250...300 °С і потім витримують протягом декількох годин. При термічному відпочинку зменшується вміст дифузійного водню в зварних з'єднаннях, а також дещо знижується рівень зварювальних напружень. Відпочинок зазвичай призначають для зварних з'єднань товстостінних конструкцій, для яких важко виконати термообробку по режиму високого відпускання.

До термічного відпочинку можна віднести також термообробку по режиму «дегазації» (нагрів до 200...250 °С з витримкою 1...2 год), яка проводиться при ремонті трубопроводів і корпусних конструкцій, що працювали в контакті з корозійнонебезпечними середовищами. Таку обробку виконують для зварювальних кромок до початку зварювання з метою видалення різних шкідливих газових включень (водню і т.п.) з металу, тривалий час знаходився в експлуатації.

Аустенізація. Зварене з'єднання нагрівають приблизно до 1080...1130 °С, витримують протягом 1...2 год і охолоджують на повітрі. В результаті аустенізації вдається отримати однорідну структуру аустеніту за рахунок розпаду фериту, поліпшити механічні властивості сталі і знизити рівень зварювальних напружень. Аустенізації піддають зварні з'єднання трубопроводів з вуглецевих сталей аустенітного класу марок 08X18H10T і ін. Аустенізація сприяє зниженню зварювальних напружень на 70...80% і підвищенню пластичності металу зварного з'єднання, при цьому забезпечується вирівнювання структури металу шва і металу ЗТВ.

Дотримання температури нагріву в заданому режимі має велике значення для працездатності зварного з'єднання. Коли термообробка відбувається при температурах нижче регламентованих, отримати однорідну аустенітну структуру неможливо, а перевищення заданих температур може викликати зростання зерна в металі шва і пришовній зоні й тим самим підвищити схильність металу до розтріскування. Швидкість нагріву також має важливе значення. До температури 550 °С нагрів слід проводити з малою швидкістю, що виключає появу значних температурних (тимчасових) напружень. У діапазоні 550...1100 °С (головним чином при 650...850 °С) швидкість нагрівання повинна бути вищою з тим, щоб запобігти ймовірності появи тріщин в пришовній зоні, обумовлених зниженням пластичності металу при високих температурах.

Скорочення часу витримки може привести до отримання неоднорідної структури і неповного зниження рівня зварювальних напружень. Збільшення часу витримки призводить до знеміцнення металу, а також до підвищеної окислюваності поверхні зварного з'єднання.

Для забезпечення якості аустенізації необхідно виконати охолодження зварного з'єднання на спокійному повітрі. При уповільненому охолодженні (під шаром теплоізоляції) затримується процес перетворення фериту в аустеніт.

Стабілізуючий відпал. Стабілізуючий відпал застосовують для зварних з'єднань трубопроводів з вуглецевих сталей аустенітного класу марок 08X18H10T і т.п. Зварні з'єднання нагрівають до 850...870 °С, витримують протягом 2...3 год і охолоджують на повітрі. Така термообробка призводить до зниження зварювальних напружень на 70...80% і забезпечує стабільну структуру, яка добре протидіє виникненню міжкристалічної корозії.

Нормалізація з відпусканням (повна або відновна термічна обробка - ВТО) застосовується для відновлення структури і властивостей зварних з'єднань різних сталей. ВТО набула поширення при термічній обробці зварних з'єднань теплостійких сталей з метою продовження ресурсу паропроводів та барабанів, які експлуатуються тривалий час. Нормалізація забезпечує отримання рівномірної аустенітної структури. При подальшому охолодженні відбувається перетворення аустеніту в ферит. Високе відпускання забезпечує тривалу міцність і пластичність зварних з'єднань.

Крім режиму термічної обробки, слід розглядати технологічний процес термічної обробки, до складу якої входять всі технологічні операції, що застосовуються при термообробці з самого початку підготовки до проведення робіт до їх повного закінчення (контролю якості). За часом проведення технологічні операції поділяються на підготовчі (до моменту включення установки для термообробки на нагрів), безпосередньо термічну обробку (до моменту закінчення охолодження зварного з'єднання після витримки) і заключні (закінчуються контролем якості зварних з'єднань після термообробки).

Важливим є питання призначення термічної обробки комбінованих з'єднань, тобто з'єднань різнорідних сталей. При виборі виду і режиму термічної обробки зварних з'єднань різнорідних сталей необхідно в першу чергу враховувати групу з'єднання сталей: перша група - з'єднання сталей одного структурного класу, але різного ступеня легування; друга - з'єднання сталей різних структурних класів.

До першої групи можна віднести зварні з'єднання сталей перлітного класу комбінацій: сталь 20 + 12X1MФ, 15ГС + 15X1M1Ф, 20 + 15X1M1ФЛ і ін. Необхідність в проведенні термічної обробки визначається по сталі з більш високим ступенем легування з урахуванням номінальної товщини зварного з'єднання. Режими термічної обробки, наприклад високе відпускання, зварного з'єднання трубопроводу вибираються наступним чином: температура - як середня між температурами відпускання, рекомендованими для кожної сталі, і час витримки по сталі з більш високим ступенем легування. Аналогічні рекомендації стосуються до сталей інших структурних класів.

До другої групи можна віднести з'єднання сталей наступних класів: аустенітного і перлітного, мартенситно-феритного і перлітного, аустенітного і мартенситно-феритного. З'єднання сталей аустенітного і перлітного класів, наприклад комбінацій 20 + X18H12T і 12X1MФ + X18H9T, термічно не обробляються. Термічна обробка таких зварних з'єднань вважається шкідливою, так як нагрів сталей з різними коефіцієнтами лінійного розширення призводить до появи локальних термічних напружень.

Причинами часткової чи повної відмови від термообробки можуть бути випадки, коли неможливо або важко провести термічну обробку, особливо в умовах термінового ремонту.

В даний час існує два основних технологічних методи проведення таких робіт. Перший з них передбачає застосування при зварюванні високонікелевих зварювальних матеріалів в поєднанні з рядом технологічних прийомів (лудіння, особливого порядку наплавлення, режимів зварювання та ін.). Другий метод полягає в використанні низьковуглецевого, менш легованого, ніж основний метал, зварювального матеріалу також з використанням різних технологічних операцій (підігріву, прокарбовування багат шарового шва, попереднє лудіння та ін.).

Відпал застосовується для зварних з'єднань труб і трубних елементів з високоміцного чавуну з кулястим графітом при діаметрі труб до 325 мм з товщиною стінки до 8 мм. Нагрівання до 920...960 °С за 5...15 хв, витримка 15 хв., охолодження під шаром ізоляції до 700 °С, далі на спокійному повітрі. Відпал проводиться для отримання однорідної структури шва і зони термічного впливу.

Вироби з низьковуглецевих і низьколегованих сталей перлітного класу підігрівають (особливо в зимовий час) до 100...300 °С, що оберігає зварене з'єднання при зварюванні від швидкого охолодження, що приводить до виникнення тріщин у шві. Розрізняють попередній підігрів (до початку зварювання) і супутній (безпосередньо в процесі зварювання або під час перерв в процесі зварювання).

У поняття «режим термообробки зварного з'єднання», крім вищевказаних видів термообробки, температури (T , °С) і швидкості нагріву (V_n , °С/год), часу витримки (t_b), швидкості (V_0 , °С/год) або характеру охолодження, входять також величини зон повного і рівномірного (в межах температури термообробки) нагріву, зони установки теплоізоляції (рис. 2.3), способи нагріву і контролю температури.

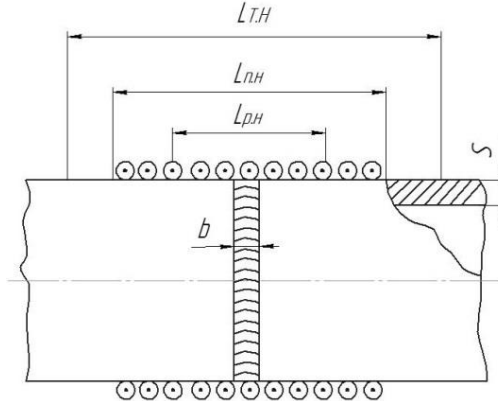
У деяких випадках також обумовлюють час допустимої перерви між закінченням зварювання та початком термообробки, товщину теплоізоляції зварного з'єднання. У зарубіжній практиці до режиму термічної обробки відносять температуру попереднього і супутнього підігрівів.

Розмір $L_{пн}$ дорівнює ширині встановленого на зварне з'єднання джерела нагріву (рис. 2.3). Розмір $L_{рн}$ в межах 30 °С (наприклад, 710...740 °С) дорівнює $0,5L_{пн}$. Розмір $L_{рн}$, як правило, задається нормативною технічною документацією, і в загальному випадку

дорівнює ширині шва b плюс ширина ділянок, рівних двом товщинам стінки s на кожную сторону від зварного шва:

$$L_{рн} = b + 4s.$$

Розмір зони установки теплоізоляції $L_{тн}$ повинен бути в два рази більше зони повного нагріву $L_{пн}$.



s – товщина стінки виробу, b – ширина шва

Рисунок 2.3 – Зона встановлення теплоізоляції $L_{тн}$, зони повного нагріву $L_{пн}$ та рівномірного нагріву $L_{рн}$ при термічній обробці зварного з'єднання

Велика кількість зварних з'єднань у виробничих умовах піддаються місцевій термообробці. Це дозволяє радикально знизити енергозатрати за рахунок оптимізації режимів термічної обробки. Типові режими місцевої термообробки зварних з'єднань деяких марок сталей наведені в табл. 2.1.

До переваг місцевого нагріву слід віднести можливість:

- широкого використання легких та невеликих за розміром електронагрівачів (індукторів, електронагрівачів опору і т.п.);
- застосування швидкого нагріву і широкого діапазону швидкостей нагріву, що в багатьох випадках створює сприятливі умови для отримання високої якості і економічності робіт;
- ефективного проведення термообробки зварних з'єднань конструкцій, на яких відстань між об'єктами термообробки може досягати десяти і більше метрів;
- здійснення безперервного циклу зварювання-термічна

обробка, коли термообробка починається відразу після закінчення зварювання;

– проведення попереднього і супутнього підігріву для зварювання, а також подальшої термообробки з використанням одних і тих же нагрівальних пристроїв.

Таблиця 2.1 - Типові режими місцевої термообробки зварних з'єднань

Зварювана сталь	Вид термообробки	Товщина сталі S, мм	Режим термообробки			
			Температура, °C	Швидкість нагріву, °C/Г	Витримка, г, не менше	Характер охолодження
Вуглецева сталь 20	Високе відпускання	≤20 21...70	570...600 570...600	≤300 ≤250	1,0 2,0...3,0	Під шаром теплоізоляції
Низьколегована 09Г2С	Те саме	≤20 21...70	570...600 570...600	≤300 ≤250	1,0 2,0...3,0	Те саме
Низьколегована 12Х1МФ	Те саме	10...20 21...70	710...740 710...740	≤300 ≤250	1,0 2,0...3,0	Те саме
Низьколегована 15Х5М	Те саме	≤20	740...760	≤400	2,5	Те саме
Високолегована 08Х18Н10Т	Аустенізація	≤20 >20	1080...1130	≥150 ≥150	1,5 2,0	На повітрі
	Стабілізуючий відпал	≤20 >20	850...870	≥150 150	2,0 3,0	Те саме

Недоліки місцевого нагріву:

– нерівномірність нагріву різних зон зварного з'єднання, як по периметру, так і по товщині стінки, що викликає появу власних температурних напружень, які підсумовуючись зі зварювальними напруженнями в початковому стані можуть викликати виникнення тріщин в зварних з'єднаннях;

– нерівномірність нагріву також може привести до погіршення структури механічних і спеціальних властивостей зварного з'єднання;

– можливість отримання деформації зварних конструкцій.

Негативний вплив місцевої термічної обробки послабляють за рахунок застосування спеціальних технологічних прийомів і режимів термообробки.

Наприклад, при проведенні місцевого відпускання необхідно

прагнути до того, щоб залишкові напруження, які виникають внаслідок нерівномірного нагріву, були мінімальними та знаходились в зоні, де відсутні концентратори напружень. Так, якщо при місцевому відпусканні кільцевого стику нагрівалась вузька зона (рис. 2.4 а, крива 1), то при остиганні, як і при зварюванні, знову буде виникати вигин труби з розтягом у корені шва. При нагріві більш широкої зони (рис. 2.4 а, крива 2) залишкові напруження при остиганні будуть виникати в основному в стороні від шва, в місцях максимальних градієнтів температур (заштриховані зони), а не в корені шва.

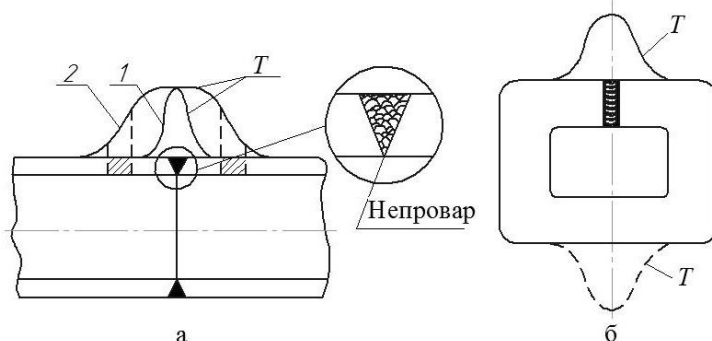


Рисунок 2.4 – Криві розподілу температури T при місцевому відпусканні зварних з'єднань

Залишкові напруження можна зменшити також більш плавною зміною температури по довжині деталі. Слід уникати призначення місцевої термообробки в замкнутому контурі (рис. 2.4 б) без компенсації температурного скорочення, що виникає при охолодженні. Доцільно проводити одночасно нагрів в іншому перерізі, як це схематично показано на рис. 2.4, б.

2.2 Способи нагріву

Спосіб нагріву вибирають з умови мінімізації економічних витрат і забезпечення необхідних режимів термообробки. При цьому також враховують необхідність можливого мінімального перепаду температури по товщині стінки металоконструкції, а також забезпечення рівномірності нагріву по всій довжині або периметру зварного з'єднання.

При проведенні місцевої термообробки зварних з'єднань застосовують такі способи:

- радіаційний (електронагрівачами опору і газополуменевим нагрівом);
- індукційний (струмами промислової частоти 50 Гц і середньої частоти 1000...8000 Гц);
- електроконтактні;
- комбінований;
- термохімічний.

Радіаційний спосіб забезпечує передачу теплоти випромінюванням від джерела нагрівання до виробу, що нагрівається через теплоносій, яким є нагріте повітря.

Нагрівання електронагрівачами опору здійснюється теплотою, що виділяється в нагрівальному елементі (стрічка або дріт з високим електроопором) в момент проходження по ньому електричного струму (рис. 2.5 а).

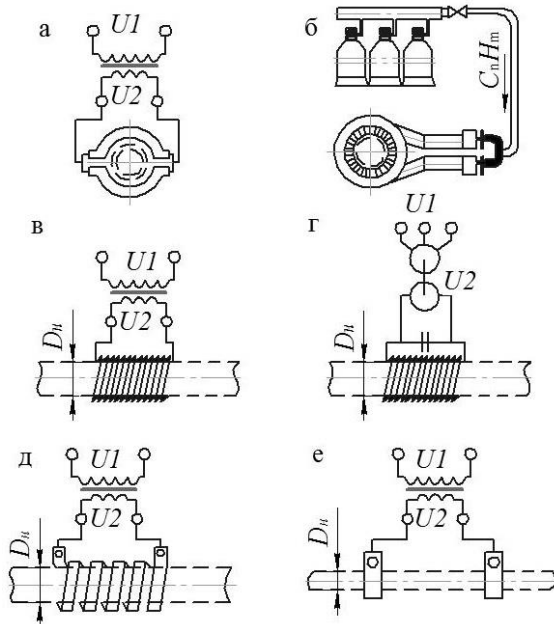
Переваги способу: невеликі витрати електроенергії (в ланцюзі нагрівача практично відсутня реактивна потужність), можливість дистанційного керування і автоматизації процесу термообробки, проведення групового нагріву (одночасно декількох зварних з'єднань від одного джерела живлення) і нагрівання зварних з'єднань до температури нормалізації або аустенізації (більше 900 °С).

Недоліки способу: нерівномірність нагріву виробів як по товщині, так і по периметру зварного з'єднання; перепад температури по товщині з'єднання зазвичай становить 1 °С/мм цієї товщини; різниця температури по периметру вертикального зварного з'єднання, що нагрівається, може досягати 100 °С.

Газополуменевий нагрів полягає в підводі теплоти, що виділяється при згорянні газової суміші, до зовнішньої сторони виробу (рис. 2.5 б). Як горючий газ застосовують ацетилен, пропан-бутанову суміш, природний газ, до яких додають кисень або повітря. Місця обробки виробів нагрівають однополуменевими універсальними ацетилено-кисневими пальниками або кільцевими багатополуменевими пальниками.

При об'ємній термообробці корпусних конструкцій використовують головним чином газополуменевий нагрів від спеціально розробленого для цих цілей пересувного обладнання, яке

легко може бути переміщено від одного об'єкта термічної обробки до іншого. При цьому способі нагріву факел полум'я або теплоносій спрямовані всередину при термообробці конструкції.



а - радіаційний - електронагрівачем опору; б - радіаційний - газополуменевим нагрівачем; в - індукційний - струмами промислової частоти 50 Гц; г - індукційний - струмами середньої частоти 1000...8000 Гц; д - комбінований - електронагрівачами опору і індукційний 50 Гц; е - електроконтактний - прямого нагріву

Рисунок 2.5 - Способи нагріву зварних з'єднань трубопроводів при місцевій термообробці

Переваги способу: маневреність, тобто можливість термообробки важкодоступних зварних з'єднань; проведення термообробки при відсутності електроенергії.

Недоліки способу: одностороннє підведення теплоти із зовнішнього боку виробу може викликати значний перепад температури по товщині зварного з'єднання, що перевищує $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мм}$ товщини зварного з'єднання виробу; зіткнення газового полум'я з виробом, що призводить до окислення його поверхні (згоряння поверхневого шару металу); процес газополуменевої термообробки важко піддається автоматизації та дистанційного управління і характеризується підвищеною небезпекою виконання робіт.

Індукційний спосіб полягає в нагріванні зварного з'єднання електричним струмом, індукованим в металі змінним електромагнітним полем (рис. 2.5, в, г). Перепад температури по товщині зварного з'єднання незначний, так як теплота утворюється безпосередньо в самому металі.

Загальні переваги способу: простота управління процесом нагріву, можливість застосування дистанційного ручного або автоматичного регулювання процесу ТО і проведення групової термообробки.

Загальні недоліки способу: громіздкість електрообладнання, виникнення змінних електромагнітних полів, що ускладнюють контроль температури.

Нагрівання струмами частотою 50 Гц доцільно застосовувати для термообробки по режиму високого відпускання зварних з'єднань труб з великою товщиною стінки (більше 40 мм). Однак при цьому, як правило, застосовують електричний струм до 1400 А, що вимагає використання мідних електричних проводів та індукторів великого перерізу (до 240 мм²) або індукторів, що охолоджуються водою.

Переваги способу - рівномірність нагріву стикових з'єднань по товщині аж до 70...100 мм.

Недоліки способу: малоекономічний, характеризується високою витратою електроенергії (в зв'язку з малим коефіцієнтом потужності: 0,25...0,3), великою витратою матеріалів і трудомісткістю робіт.

Нагрівання струмами середньої частоти проводять на невеликому струмі (100...300 А), завдяки чому можна застосовувати мідні дроти і індуктори невеликого перерізу. До переваг цього способу необхідно віднести також високий коефіцієнт потужності $\cos\varphi = 0,9...1$.

Переваги способу: економічність - дозволяє використовувати установки невеликої потужності, зменшити трудомісткість операцій, широко застосовувати групову термообробку.

Недоліки способу: висока складність і вартість обладнання для термообробки; електрично небезпечний спосіб нагріву внаслідок високої напруги на виводах індуктора (200...300 В); більша, ніж при індукційному нагріванні величина перепаду температури по товщині з'єднання, внаслідок чого, потрібні знижені швидкості підйому температур.

Електроконтактний спосіб здійснюється шляхом розміщення термооброблюваної деталі (згин труби, пряма ділянка труби зі звареним швом та ін.) між двома струмопідводами з мідними затискачами, до яких підводиться електричний струм від потужного трансформатора (рис. 2.5 е). Нагрівання ділянки виробу між струмопідводами здійснюється при проходженні по ньому електричного струму. Контактний спосіб нагріву застосовують для аустенізації холодних згинів труб з аустенітних корозійностійких сталей 08Х18Н9Т та інших діаметром до 108 мм, а також нормалізації і високого відпускання зварних з'єднань труб діаметром до 108 мм.

Переваги способу: економічність і простота, забезпечення термічної обробки у важкодоступних місцях; забезпечення рівномірного нагріву; можливість дистанційного керування режимами нагріву.

Недоліки способу: можливість перегріву або підплавлення (припикання) при термообробці виробу в місцях контакту з мідними губками; необхідні великі струми нагріву (до 5...10 кА) в ланцюзі.

Комбінований спосіб забезпечується електронагрівачами комбінованої дії, в яких застосовують методи нагріву електричним опором і нагріванням індукційним струмом частотою 50 Гц (рис. 2.5 д). При цьому нагрів здійснюється головним чином за рахунок першого способу, тому індукційна складова чинить менший тепловий вплив. Електронагрівачі комбінованої дії прості у виготовленні, кожен їх типорозмір можна застосовувати для декількох діаметрів труб.

Переваги способу: простота управління процесом нагріву, можливість застосування дистанційного ручного або автоматичного регулювання процесу нагріву, проведення групової термообробки і термообробки важкодоступних зварних з'єднань; коефіцієнт потужності процесу становить приблизно 0,9.

За своїми техніко-економічними показниками нагрів електронагрівачами комбінованої дії зазвичай відносять до нагрівання електронагрівачами опору.

До способів комбінованого нагріву також відносять двосторонній нагрів зварних з'єднань товстостінних технологічних посудин тиску (колон, апаратів і т.п.), коли зварна конструкція з зовнішнього боку нагрівається електронагрівачами опору, а зсередини - газополуменевим нагріванням (встановити електронагрівачі опору

всередині посудини тиску важко). Такий спосіб нагріву забезпечує незначні величини перепаду температури по товщині стінки.

Термохімічний спосіб заснований на отриманні теплоти, необхідної для термообробки, що утворюється при згоранні пакетів з екзотермічних сумішей, що встановлюються на зварене з'єднання. Ці суміші, до складу яких входять оксиди алюмінію, сполуки сірки і фосфору, дають при згорянні велику кількість теплоти.

Переваги способу: простота процесу; можливість проведення термообробки без застосування електроенергії і горючих газів.

Недоліки способу: труднощі проведення контролю температури нагріву і застосування ручного або автоматичного регулювання процесу нагріву; значний перепад температури по товщині стінки труби.

2.3 Нагрівальні пристрої для термообробки

Для термічної обробки зварних з'єднань, а також для їх підігріву при зварюванні використовують різноманітні нагрівальні пристрої: електронагрівачі опору, індукційні електронагрівачі, електронагрівачі комбінованої дії, газополум'яні нагрівачі, пристрої для термохімічного нагріву.

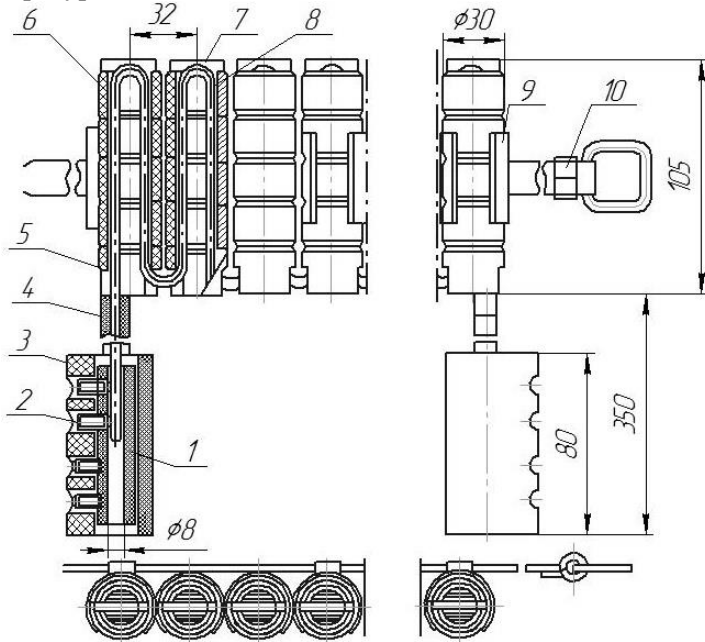
Нагрівальні пристрої повинні мати невелику масу, високі ККД і коефіцієнт потужності (для електронагрівачів), легко встановлюватися на оброблюваному виробі, забезпечувати рівномірність нагрівання по периметру виробу, допустимий перепад температури по товщині стінки і інше.

Електронагрівачі опору відносяться до радіаційних нагрівачів, в яких електрична енергія перетворюється в теплоту в твердому тілі (ніхромової спіралі), безпосередньо ввімкненому в електричний ланцюг. При нагріванні до 200 °С основним видом передачі теплоти є конвекція. В межах 200...1200 °С теплота передається головним чином випромінюванням (радіацією).

Застосовують різні типи електронагрівачів опору: гнучкі, жорсткі, з керамічної ізоляцією, в металевому обплетенні, у виді стрічок, муфелей та панелей.

Гнучкі пальцеві електронагрівачі опору отримали широке

використання у монтажних, польових і ремонтних умовах Вони складаються з подвійної плоскої спіралі (ніхромовий дрiт $\varnothing 3,6$ мм), кожен виток (палець) якої захищений керамічними ізоляторами (рис. 2.6). До переваг гнучких пальцевих електронагрівачів слід віднести велику питому потужність (45...50 кВт на 1 м^2 поверхні), можливість використання як джерела живлення зварювального обладнання (переважно трансформаторів), простоту в експлуатації, високий коефіцієнт потужності ($\cos \varphi = 1$), простоту застосування при нагріванні плоских конструкцій. Максимальна температура нагріву 1000°C , ресурс не менше 250 год.



1 - контактна втулка; 2 - гвинт; 3-6 - керамічні нагрівальні ізолятори; 7 - обмежувач;
8 - нагрівальний елемент; 9 - скоба; 10 - поясок для кріплення електронагрівача

Рисунок 2.6 - Гнучкий пальцевий електронагрівач

Муфельні нагрівачі опору використовують для термічної обробки зварних з'єднань з труб $\varnothing 57...1020$ мм в польових умовах. У металевому кожусі цього пристрою (рис. 2.7) розміщений нагрівальний елемент у виді змійовика з ніхромової смуги. Під кришкою нагрівача розташована легка змінна теплоізоляція. Робочий струм нагрівачів 90...1600 А, маса 16...176 кг.

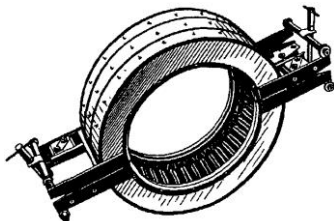


Рисунок 2.7 - Муфельний нагрівач опору

Обплетений електронагрівач являє собою змійовик з ніхромового дроту діаметром 0,5...0,6 мм, покритий скловатою. Зовнішнє покриття електронагрівачів виконано у виді обплетення з тонкого ніхромового дроту. Електронагрівачі забезпечують більшу зону нагріву при невеликій питомій потужності (2...3 Вт/см²). Максимальна температура нагріву 1050 °С, ресурс не менше 100 год.

Гнучкий поверхневий електронагрівач (нагрівальні мати) виконаний у виді плоского мату, в якому нагрівальним елементом служить змійовик з ніхромового дроту діаметром 0,5...0,6 мм, покритий плоскими керамічними ізоляторами (рис. 2.8). Ці електронагрівачі, аналогічно обплетеним, забезпечують більшу зону нагріву при невеликій питомій потужності (3...4 Вт/см²). Максимальна температура нагріву 1050 °С при ресурсі не менше 100 год.

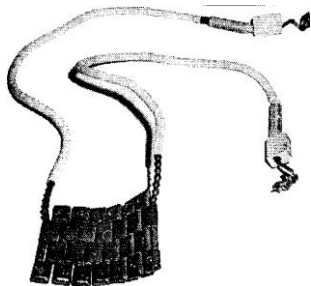


Рисунок 2.8 - Електронагрівач опору типу нагрівальних матів

Пласкі електронагрівачі інфрачервоного випромінювання застосовуються для термообробки товстостінних зварних з'єднань технологічного корпусного обладнання. При цьому способі нагрівання здійснюється інфрачервоним випромінюванням, що характеризується великою проникаючою здатністю в глибину металу, який нагрівається. Це сприяє зменшенню перепаду температури по товщині стінки конструкції.

Інфрачервоні електронагрівачі зібрані зі спеціальних пластин, які з боку, зверненого до зварного з'єднання, покриті металевим окисним з'єднанням з високою здатністю до випромінювання (коефіцієнт 0,9) (рис. 2.9). Максимальна температура нагріву 1000 °С, робоча напруга до 200 В.

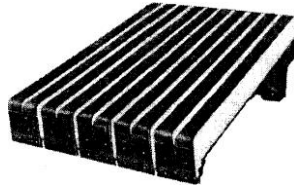


Рисунок 2.9 - Інфрачервоний електронагрівач

Електронагрівачі комбінованої дії використовують нагрів способом опору в поєднанні зі способом індукційного нагріву струмами частотою 50 Гц, причому основним по ефективності є нагрів способом опору. Електронагрівачі виготовляють у виді дроту, що складається з ніхромового дроту діаметром 3,6 мм, на який надіти керамічні ізолятори (рис. 2.10). Максимальна температура нагріву 1000 °С, ресурс не менше 250 год.

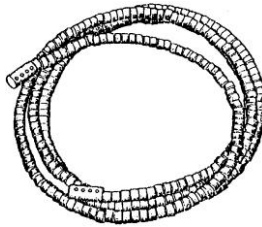
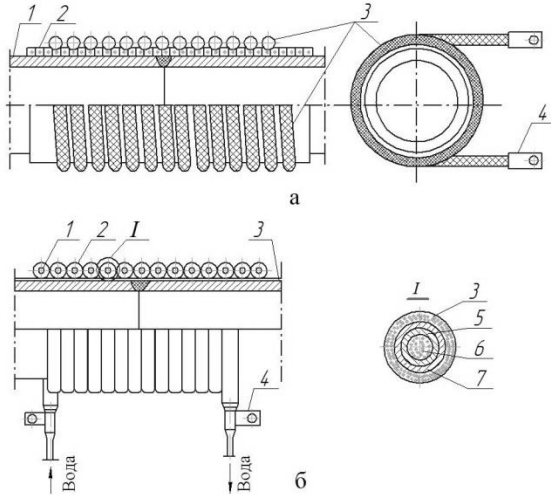


Рисунок 2.10 - Електронагрівач комбінованої дії

Індукційні електронагрівачі являють собою соленоїди, які зазвичай виконані з міді. Індуктори встановлюють (частіше намотують) на зварні з'єднання, які попередньо покриті теплоізоляцією.

Відомі кілька типів індукторів: гнучкі, жорсткі, з ізоляцією і без неї, з повітряним і водяним охолодженням і т.п. У практиці зазвичай використовують повітроохолоджувальні гнучкі індуктори з оголеного мідного дроту типів М, МГ, МГЕ (рис. 2.11, а). Мідні дроти типу МГ і більш гнучкі, ніж дроти типу М, проте термін їх експлуатації менше (8...10 циклів нагрівання). Термін експлуатації дроту типу М триваліший (10...12 циклів нагріву), але установка трудомістка через його недостатню гнучкість.



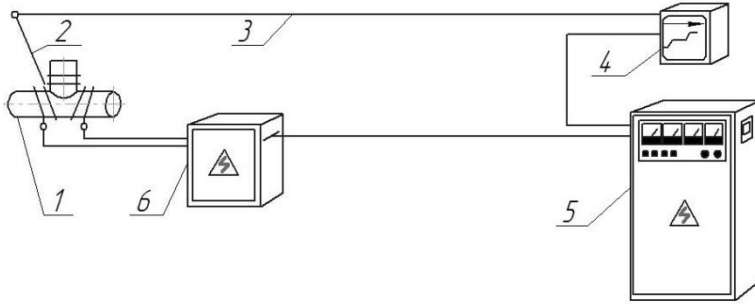
а - гнучкий індуктор з оголеного мідного дроту (1 - зварне з'єднання; 2 - теплоізоляція; 3 - мідний дріт; 4 - клемма індуктора); б - гнучкий водоохолоджуваний індуктор (1 - витки індуктора; 2 - ізоляція; 3 - зварне з'єднання; 4 - клемми індуктора; 5 - латунна гофрована трубка; 6 - охолоджуюча вода; 7 - мідний кабель (обплетення))

Рисунок 2.11 - Індукційні електронагрівачі, що встановлені на зварні з'єднання

Гнучкі індуктори з оголеного мідного дроту, що працюють на електричному струмі промислової частоти 50 Гц, мають перетин 180...240 мм². Їх намотують на зварне з'єднання, як правило, в один шар з 6...12 витками із зазорами між ними 15...20 мм (рис. 2.11 а). Вони працюють на силі струму до 1200...1400 А. Аналогічні індуктори, що працюють на електричному струмі середньої частоти 1000...8000 Гц, мають перетин 35...95 мм², їх намотують на трубу в один шар з 6...20 витками з зазором 15...20 мм. Працюють на силі струму до 250 А. Для всіх індукторів необхідно попереднє намотування на трубу теплоізоляційного шару завтовшки не менше 20 мм.

Більш тривалий термін експлуатації (100...150 циклів нагрівання) мають гнучкі водоохолоджувані індуктори, що складаються з нержавіючої або латунної гофрованої гнучкої трубки, на зовнішній поверхні якої розташований у виді обплетення багатожильний мідний кабель (рис. 2.11 б), зовнішня поверхня мідного обплетення покрита гнучкою азбестовою оболонкою. Охолоджуюча вода циркулює всередині гнучкої трубки.

Водоохолоджувані індуктори (рис. 2.12) намотують на трубу, також попередньо покриту теплоізоляцією товщиною 15...20 мм. Витки індукторів можна намотувати впритул один до одного (без зазорів). Ці індуктори працюють на силі струму до 300 А.



- 1 - зварне з'єднання; 2 - термопара; 3 - термоелектродний провід; 4 - автоматичний ресетруючий потенціометр; 5 - перетворювач струмів середньої частоти;
6 – конденсатор

Рисунок 2.12 - Принципова схема індукційної установки струмів середньої частоти з водоохолоджуваним гнучким індуктором

До переваг індукторів, що охолоджуються водою слід віднести можливість використання великої густини струму 20...25 А/мм² (у повітроохолоджувальних індукторів густина струму не перевищує 5 А/мм²). Крім того, ці індуктори мають високу технологічність, що дозволяє намотувати індуктор у два шари в процесі термообробки при тимчасовому відключенні джерела живлення змінювати число і розташування витків індуктора.

Недолік водоохолоджуваних індукторів - необхідність застосування води, що важко в монтажних умовах, особливо в зимовий час.

Жорсткі роз'ємні індуктори (мідні і алюмінієві) в даний час використовують обмежено в зв'язку з їхньою складною конструкцією і недостатньою експлуатаційною надійністю (жорсткі мідні індуктори застосовують в даний час в окремих випадках при відновлювальній термообробці).

Пристрої газополуменевого нагріву використовують для термічної обробки зварних з'єднань невеликих розмірів. Для змішування горючого газу з повітрям (або киснем), подачі отриманої газової суміші до вихідних отворів і згоряння цієї суміші у виді стійкого факела призначений газополуменевий пальник. У кільцевому

багатополуменевому пальнику кільцевий факел полум'я утворюється з великого числа язичків, рівномірно розташованих по кільцю в кілька рядів.

Газове полум'я нагріває поверхню металу за допомогою вимушеного конвективного і променистого теплообміну. Наскрізний прогрів зварного з'єднання забезпечується теплопровідністю металу.

Залежно від розмірів термообробних конструкцій використовують однополуменеві універсальні ацетиленокисневі пальники, кільцеві багатополуменеві пальники і нагрівальні газополуменеві пристрої, що входять до складу установок для об'ємної (повної) термообробки корпусного технологічного обладнання.

Пристрої термохімічного нагріву випускають у виді гнучких пластин (килимків), гнучких шнурів і жорстких муфелей, виконаних строго по діаметру виробу.

При виборі засобів нагріву слід враховувати режим термообробки, марку сталі, розміри зварного з'єднання (діаметр і товщину стінки), конструкцію зварних з'єднань, особливості різних методів нагріву, особливі вимоги. Так, для місцевої термообробки зварних з'єднань з корозійностійких нержавіючих сталей забороняється використання газополуменевого нагріву. Слід враховувати, що електронагрівачі опору, а також комбінованої дії мають значну теплову інерційність. При цьому нагрів зварного з'єднання починається через деякий проміжок часу після подачі електроживлення, тобто коли набере температуру нагрівальний елемент. Припинення нагрівання зварного з'єднання відбувається після відключення електроенергії також з затримкою, поки не знизиться температура нагрівального елемента. Теплова інерційність збільшується зі зростанням потужності електронагрівача. Це слід враховувати при термообробці, особливо при налагодженні процесу автоматичного програмного нагріву.

2.4 Аргонодугова обробка

Сутність способу та призначення. Аргонодугова обробка застосовується для створення плавного переходу від шва до основного

металу шляхом оплавлення кордонів шва неплавким вольфрамовим електродом в середовищі аргону (рис. 2.13). Зазвичай обробку виконують без присадного дроту, в окремих випадках необхідне використання присадки.

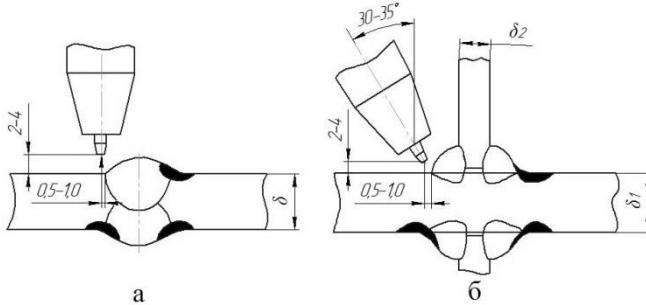
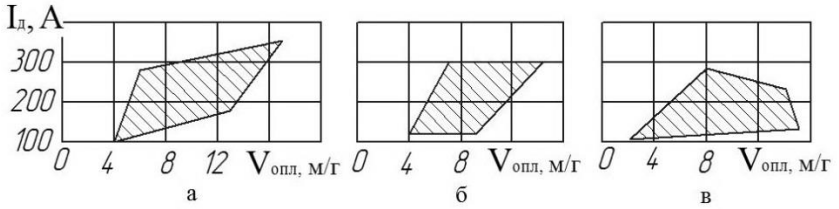


Рисунок 2.13 - Схеми розташування електрода щодо шва при аргонодугій обробці стикового (а) і таврового (б) з'єднань

Застосування аргонодугової обробки дозволяє:

- зменшити концентрації напружень і підвищити працездатність зварних з'єднань з низьковуглецевих, низьколегованих і термічно поліпшених сталей відносно простим способом;
- виконати обробку в будь-яких доступних місцях звареної конструкції у всіх просторових положеннях при відносно низьких енергетичних і капітальних витратах;
- підвищити міцність оплавленого металу при досить високій пластичності;
- усунути дефекти у виді мікропідрізів, напливів та подрібнення неметалічних включень;
- зменшити концентрації водню в обробленому металі в 2...2,5 рази;
- перерозподілити залишкові напруги і знизити їх загальний рівень приблизно на 20...25 %.

На рис. 2.14 наведені області оптимальних режимів аргонодугової обробки швів (I_d – струм дуги; $V_{опл}$ – швидкість оплавлення) при оплавленні місць переходу від шва до основного металу вольфрамовим електродом діаметром 4 мм. Залежність параметрів перетину оплавленого металу (b - ширина оплавлення, h - глибина оплавлення, $F_{рм}$ - площа оплавлення) від сили струму і швидкості аргонодугової обробки представлена на рис. 2.15.



а - нижнє положення; б - вертикальне; в - стельове

Рисунок 2.14 - Области оптимальних режимів аргондугової обробки швів

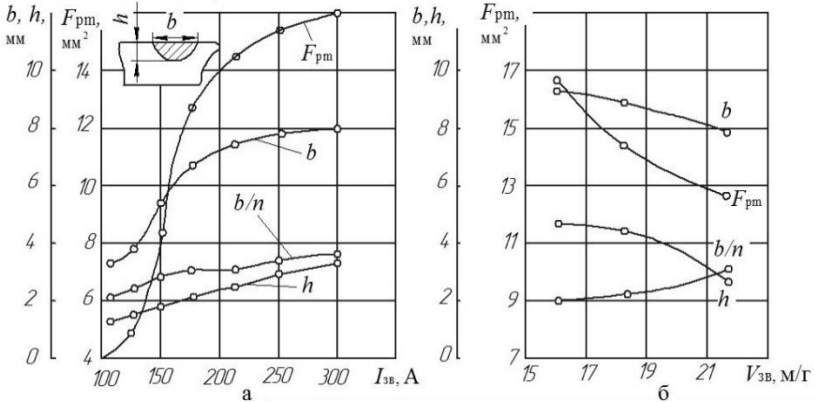
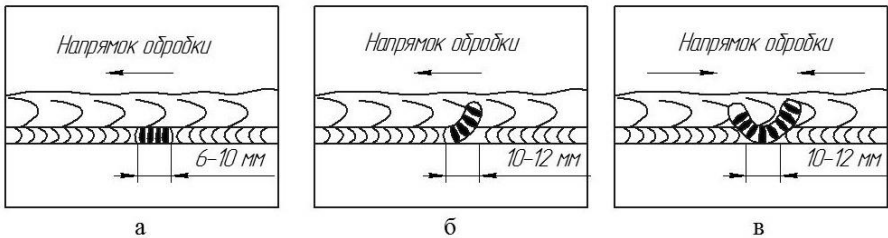


Рисунок 2.15 - Криві залежності параметрів перетину оплавленого металу від сили струму (а) ($U_d = 13$ В, $V_{зв} = 16$ м/ч) і швидкості аргондугової обробки (б) ($U_d = 12$ В, $I_{зв} = 250$ А)

При аргондуговій обробці збільшення сили струму призводить до незначного підвищення форми провару, збільшення швидкості оплавлення - до його зменшення.

Техніка оплавлення включає ряд прийомів, що виключають можливість утворення дефектних початкових ділянок і кратерів в місцях переходу від шва до основного металу (рис. 2.16).



а - перехльост; б - запалювання дуги на шві;

в - початок і закінчення оплавлення дуги на шві

Рисунок 2.16 - Схеми оплавлення при аргондуговій обробці

Так, повторне запалювання дуги виконують на відстані 6...10 мм позаду краю вже існуючого валика при оплавленні в одному напрямку (рис. 2.16 а), або шляхом запалювання дуги на основному металі з перекладом її на кромку (рис. 2.16 б). У разі замикання двох валиків при зустрічному оплавленні кінці валиків з кратерами виводять на основний шов (рис. 2.16 в).

На якість оплавлення сильний вплив надають окалина, наждачний пил, іржа і масло, що потрапляють в зону обробки. Тому зазначена зона попередньо повинна бути очищена сталевією щіткою і ганчіркою. Зазвичай мікротвердість оплавленої зони не перевищує 350 HV. При обробці низьколегованих сталей можуть утворитися гартівні структури, твердість яких перевищує 350 HV. В цьому випадку при оплавленні застосовують спосіб зворотно-поступального переміщення пальника.

Зварні з'єднання після аргонодугової обробки зберігають механічні властивості на рівні властивості зварного з'єднання без обробки, а в деяких випадках на сталях бейнітного класу така обробка дозволяє підвищити міцність зварних з'єднань при негативних температурах. Оплавлення досить ефективно підвищує ударну міцність зварних з'єднань.

Зменшення концентрації напружень в поєднанні з рафінуючою обробкою на ділянці переходу шва до основного металу при аргонодуговій обробці вуглецевих низьколегованих сталей сприяє підвищенню витривалості стикових зварних з'єднань на 40...60 %, а напусткових - на 11...20 %. Так межі витривалості стикових швів високоміцної сталі 14ХМНДФР при повторноударних навантаженнях на базі $2 \cdot 10^6$ циклів після аргонодугової обробки підвищуються на 45 %, а довговічність таврових з'єднань - в 5...6 разів.

Найбільш широко аргонодугову обробку використовують при виробництві зварних конструкцій рухомого складу залізниць. Одними з найбільш навантажених зварних деталей є рами візків, які піддаються при експлуатації значним динамічним навантаженням різного характеру. Під дією цих навантажень в рамах візків можливе накопичення втомних пошкоджень, створення й розвиток втомних тріщин. При несприятливому поєднанні діючих навантажень в умовах низьких температур можливо також крихке руйнування рам візків через наявні втомних тріщин або дефектів зварних швів.

Тріщини з'являються в місцях найбільшої концентрації

напружень на межі переходу від шва до основного металу або в корені стикових, кутових, напусткових і таврових з'єднань. При накладенні м'яких зварних швів, міцність яких менше міцності основного металу і зони термічного впливу, і створенні плавного переходу на кордоні шва з основним металом втомні тріщини можуть виникати на зовнішній поверхні шва на відстані 0,5...1,0 мм від границі переходу до основного металу. Найбільш часто джерелом виникнення втомних тріщин є границя переходу від шва до основного металу.

Основною причиною виникнення втомних тріщин в рамках візків електропоїздів є високий рівень концентрації напружень на кордоні переходів від шва до основного металу.

Оптимальним способом усунення зазначених концентраторів є аргонодугова обробка. Ресурс роботи рам візків, зварні шви яких пройшли аргонодугову обробку, істотно вище, ніж рам з необробленими швами і рам, підданих високому відпуску.

Аргонодуговій обробці піддають і ділянки швів поздовжніх балок рам візків магістральних тепловозів.

За допомогою аргонодугової обробки поверхні зварних швів можна підвищити їх ударну в'язкість.

Аргонодугову обробку використовують і для підвищення пластичності зварних з'єднань двофазних сталей типу 0X21H5T. Вона сприяє зменшенню феритних зерен і утворенню аустенітних прошарків між ними, завдяки чому підвищується пластичність зварного з'єднання сталей товщиною 20...24 мм феритно-аустенітного класу.

3 ДЕФОРМАЦІЙНА ОБРОБКА ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

3.1 Ультразвукова обробка

3.1.1 Сутність та схема ультразвукової обробки

Ультразвукова обробка (поверхнєве пластичне деформування) базується на використанні двох ефектів: *акустичного знеміцнення* і *акустичного зміцнення*. Вони виникають в металі під впливом ультразвукових коливань високої інтенсивності (більше декількох Вт/см²) та частотою 18...44 кГц.

Ефект акустичного знеміцнення призводить до зменшення статичних напружень, необхідних для пластичної деформації, тобто під впливом ультразвукових коливань знижується межа плинності металу. Тому, впливаючи ультразвуком на зону зварного з'єднання, можна інтенсифікувати пластичні деформації і в результаті взаємодії ультразвукових коливань з розтягувальними залишковими зварювальними напруженнями істотно знизити останні.

Зниження напружень при накладенні ультразвукових коливань в процесі пластичної деформації поряд з дією акустичних напружень пояснюється активацією затриманих дислокацій, внаслідок чого процес їх ковзання полегшується. Одночасно з процесом активації мають місце процеси усунення перешкод і утворення (генерування) нових дислокацій.

Активация дислокацій відбувається в основному в результаті поглинання акустичної енергії в місцях дефектів кристалічної решітки та інших структурних недосконалостей. Завдяки цьому за короткий час відбувається локальне нагрівання навколо цих джерел поглинання, зняття напружень, розблокування дислокацій, збільшення їх рухливості, що забезпечує більш інтенсивний хід пластичної деформації.

Вплив ультразвуку на метал, що деформується, подібний впливу нагріву.

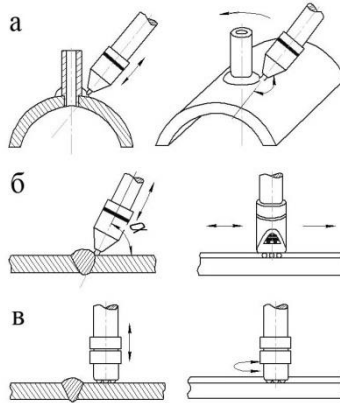
Ефект акустичного зміцнення може бути викликаний під впливом ультразвукових хвиль досить високої інтенсивності. При цьому в поверхневих шарах металу можливе утворення залишкових напружень стиску, що в ряді випадків позитивно впливає на експлуатаційні характеристики зварних з'єднань.

Схема ультразвукової ударної обробки різних типів зварних з'єднань ультразвуковими генераторами з вихідною потужністю 0,4...1,2 кВт і більше представлена на рис. 3.1.

Ефективність ультразвукової проковки зростає з підвищенням частоти. При високочастотному механічному проковуванні використовують перетворювачі на основі зворотного п'єзоелектричного ефекту з вихідною потужністю близько 0,4 кВт. Найчастіше в якості робочого органу використовують ударник, що складається з набору сталевих голок діаметром 1,6...1,9 мм. Швидкість ультразвукової обробки складає близько 0,5 м/хв.

Глибина зміцненого шару в результаті ультразвукової ударної

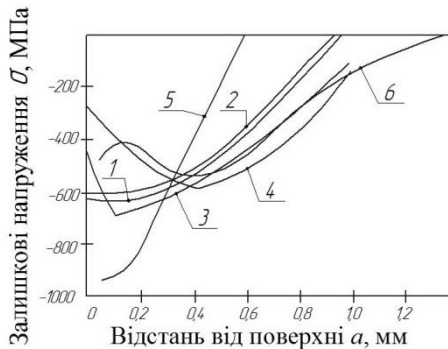
обробки конструкційної сталі підвищеної міцності може досягати 0,7 мм. При цьому в поверхневому шарі виникають залишкові стискаючі напруження, що досягають 500 МПа. Ультразвукова ударна обробка сталі 12Х18Н10Т забезпечує глибину пластично-деформованого шару до 2,8...3,2 мм, а обкатка роликem – 0,6 мм.



а – обробка шву головною з одним ударником; б – обробка шву головною з трьома ударниками; в – обробка пришовної зони багатоударниковою головною

Рисунок 3.1 - Схема ультразвукової обробки зварних з'єднань

Рівень залишкових напружень стиску після застосування ультразвукової ударної обробки в поверхневому шарі металу вище, ніж при деяких способах обробки зварних з'єднань (рис. 3.2), проте енергетичні витрати є нижчими.



1 - обробка пневмомолотком; 2-4 – обробка ультразвуковим молотком потужністю відповідно 500, 800 і 1100 Вт; 5 - дробометальна ($t = 15$ с); 6 – накатка; а - глибина зміцнення шару металу

Рисунок 3.2 - Криві розподілу залишкових напружень стиску в поверхневих шарах металу в залежності від способу і режимів обробки

3.1.2 Призначення ультразвукової обробки

Ультразвукову обробку зварних з'єднань застосовують з метою підвищення опору втоми, корозійної стійкості, стабілізації розмірів та ін.

Підвищення опору втоми зварних з'єднань і конструкцій при ультразвуковій обробці досягають за рахунок поверхневого пластичного деформування вузької зони переходу шва на основний метал. В результаті обробки стабілізується радіус сполучення по всій довжині шва і істотно знижується значення коефіцієнта концентрації напружень; зменшується шорсткість обробленої поверхні.

Створення нормованих за величиною і характером розподілу залишкових напружень стиску в пришовній зоні, що збільшують циклічну довговічність зварних конструкцій, може здійснюватися з амплітудою зміщення A , яка визначається з співвідношення:

$$2,24 \leq A \cdot 4\pi f^2 m / \sigma_{0,2} R^2 \leq 3,36,$$

де $\sigma_{0,2}$ - межа плинності стали зварної конструкції;

f - частота ударних імпульсів;

m - маса ударного інструменту;

R - радіус наконечника ударного інструменту в зоні, що обмежена лінією сплаву зварного шва з основним металом і лінією, по якій пройшли структурні перетворення.

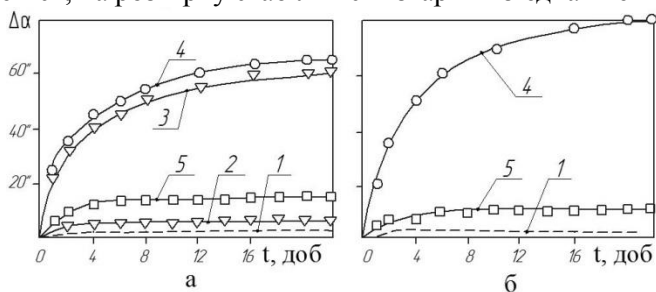
У зварних конструкціях з низьковуглецевих сталей ультразвуковий вплив здійснюють в зоні, обмеженій лінією, по якій пройшла первинна рекристалізація. У металоконструкціях з низьколегованих високоміцних сталей аналогічний вплив здійснюють в зоні, обмеженій лінією, по якій пройшов низький відпуск.

Ультразвукова ударна обробка зварних з'єднань підвищує опір корозійним і корозійно-втомним пошкодженням відповідно в 2...4 і 8...12 разів.

У деяких випадках, у разі відсутності можливості проведення термічної обробки для зниження рівня залишкових післязварювальних напружень і підвищення працездатності зварних з'єднань, раціональним є застосування ультразвукової ударної обробки. Це

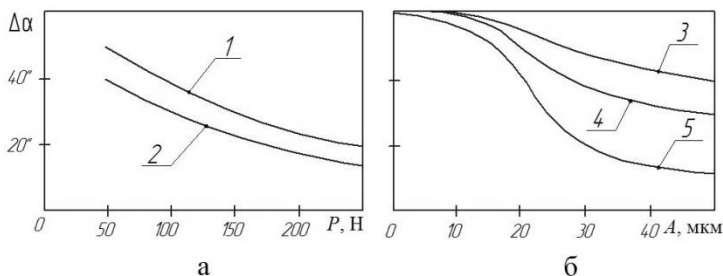
дозволяє отримати епюри залишкових напружень близьких за рівнем до напружень термічно оброблених з'єднань.

Розмірна стабільність оброблених зварних з'єднань може істотно підвищуватися внаслідок зниження залишкових напружень та структурної стабілізації металу (наприклад, мартенсит гартування) (рис. 3.3). Основними параметрами процесу ультразвукової обробки, які сприяють підвищенню розмірної стабільності зварних з'єднань, є амплітуда ультразвукових коливань A і зусилля взаємодії оброблюваної поверхні з акустичною системою зі статичною силою притиску P (рис. 3.4). Чим вище A і P , тим ефективніше розмірна стабільність, яка характеризується величиною кута $\Delta\alpha$. Зменшення $\Delta\alpha$ свідчить про менші деформації зразків і більшу розмірну стабільність. При цьому вплив часу обробки, який варіювався швидкістю переміщення хвилеводу-інструменту V відносно поверхні, що оброблюється, на розмірну стабільність зварних з'єднань є незначним.



1,2,3,5 – після ультразвукової ударної обробки на різних режимах; 4 – без обробки

Рисунок 3.3 – Розмірна стабільність ($\Delta\alpha$) плоских зразків зі сталі 35 товщиною 1,2 мм (а) та 40X13 товщиною 2,0 мм при 100 °С в залежності від часу витримки (t)



1 - $A = 30$ мкм; 2 - $A = 40$ мкм; 3 - $P = 50$ Н; 4 - $P = 100$ Н; 5 - $P = 200$ Н

Рисунок 3.4 – Вплив статичної сили притиску P (а) та амплітуди ультразвукових коливань A (б) на деформацію ($\Delta\alpha$) зразків зі сталі 35 за 20 діб при 100 °С

3.1.3 Устаткування для ультразвукової ударної обробки

В ультразвуковій техніці та технології для перетворення електричної енергії в енергію механічних коливань відповідної частоти використовують відомі фізичні явища магнітострикції і п'єзоелектричного ефекту.

Ефект магнітострикції полягає в здатності феромагнітних матеріалів змінювати свої геометричні розміри під дією магнітного поля. Феромагнітні матеріали складаються з магнітооднорідних кристалів, об'єднаних в домени. Якщо матеріал не намагнічений, то завдяки хаотичній орієнтації магнітних моментів окремих доменів всі вони в середньому взаємно компенсуються. Під дією зовнішнього магнітного поля хаотично розташовані магнітні моменти доменів повертаються в напрямку цього поля. При зміні орієнтації магнітних моментів в окремих доменах змінюється і кристалічна гратка. Безліч таких мікроскопічних деформацій, спрямованих в одну сторону, призводять до макроскопічного ефекту - зміни довжини, яке і являє собою явище магнітострикції.

Найбільшу магнітострикційну деформацію мають нікель, сплави алюмінію із залізом (Альфер), залізокобальтові сплави К49Ф2 і К65.

П'єзоелектричний ефект буває двох видів: прямий та зворотний. Прямий п'єзоелектричний ефект полягає в появі на поверхні деяких кристалів електричних зарядів під дією механічних деформацій. Зворотний п'єзоелектричний ефект - здатність кристалів (кварцу, сегнетової солі, кераміки титанату барію, цирконата-титанату свинцю і ін.) змінювати свої геометричні розміри під дією електричної напруги. Іншими словами, внесення п'єзоелектричного кристала в електричне поле, силові лінії якого збігаються з напрямом його п'єзоелектричної осі, викликає розтягнення або стиснення кристала. В ультразвукових п'єзоелектричних перетворювачах зазвичай використовується зворотний п'єзоелектричний ефект.

Магнітострикційні перетворювачі зазвичай використовують для збудження високоенергетичних коливань і роботи в нижньому діапазоні ультразвукових частот (до 44 кГц), а п'єзоелектричні - на більш високих частотах (до 20 МГц) і для створення коливань меншої інтенсивності.

Більшість магнітострикційних і п'єзоелектричних

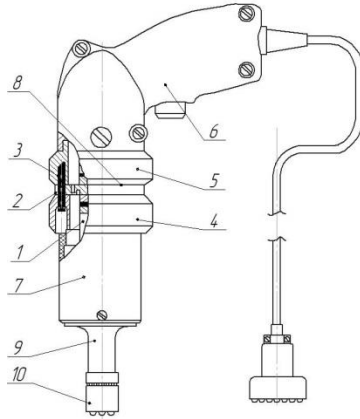
перетворювачів працює в режимі одностороннього випромінювання, коли випромінює лише одна з його сторін. Максимальна амплітуда коливань перетворювача навіть на резонансному режимі невелика - не більше 5...10 мкм. Для збільшення амплітуди коливань інструменту і узгодження перетворювача з навантаженням застосовують ультразвукові концентратори (трансформатори швидкості). Стержні або трубки постійного перетину, що з'єднують перетворювач або концентратор з навантаженням, називають ультразвуковими хвилеводами. Залежно від типу коливань розрізняють хвилеводи з поздовжніми, вигинистими, радіальними і поперечними коливаннями.

Для живлення магнітострикційних і п'єзоелектричних перетворювачів використовуються різні джерела електричної енергії з частотою коливання струму переважно в діапазоні 18...44 кГц і вихідною потужністю 0,4...5,0 кВт.

Джерело живлення (генератор) повинно мати стабільні вихідні електричні параметри, незалежно від коливань напруги мережі і зміни опору навантаження. Для коливальних систем, власна частота яких істотно змінюється в залежності від опору навантаження, джерело живлення обладнують системою стеження - автопідстроювання частоти.

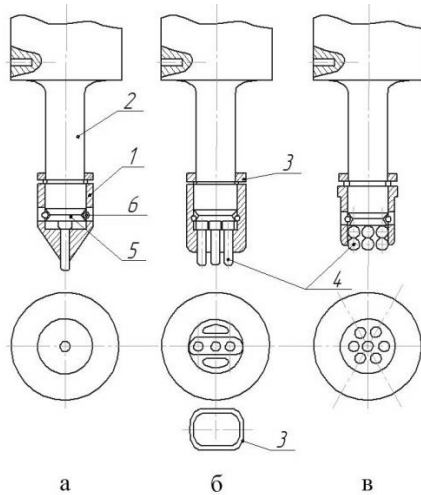
На рис. 3.5 приведена схема загального виду інструменту для ультразвукової ударної обробки в ручному виконанні. Інструмент містить ультразвуковий п'єзокерамічний перетворювач 1, який за допомогою резонансного фланця 2 прикріпленій гвинтами 3 до корпусу. Ручка 6 і пластмасовий кожух 7 кріпляться до корпусу на втулках 4 й 5. Гумова прокладка 8 перешкоджає передачі височастотної вібрації на руку оператора. До торця накладки перетворювача 1 приєднаний хвилевід-концентратор 9, на кінці якого закріплена ударна головка 10.

Варіанти ударних головок представлені на рис. 3.6. Знімна головка має корпус 1, в якому розміщені всі її конструктивні елементи. Головка вільно встановлюється на кінець хвилеводу-концентратора 2 і утримується на ньому за допомогою пружини 3. Ударні елементи у виді стержнів або кульок 4 розміщуються в каналах, виконаних в нижній частині корпусу. Між концентратором і ударними елементами розміщена загартована сталева пластина 5, яка утримується пружиною 6 і попереджає руйнування концентратора в процесі тривалої роботи.



- 1 - перетворювач; 2 - резонансний фланець; 3 - гвинт; 4,5 - втулки; 6 - ручка;
7 - кожух; 8 - прокладка; 9 - хвилевід-концентратор; 10 - ударна голівка

Рисунок 3.5 - Схема ручного інструменту для ультразвукової ударної обробки зварних з'єднань



- а - одноударна; б - однорядна; в - багатударна;

- 1 - корпус; 2 - хвилевід-концентратор; 3,6 - пружини; 4 - ударні елементи; 5 - пластина
Рисунок 3.6 - Знімні ударні голівки

Одноударна голівка (рис. 3.6 а) призначена для обробки важкодоступних ділянок шва. Однорядні голівки (рис. 3.6 б) призначені для зміцнення вузької зони між швом і основним металом, багатударна (рис. 3.6 в) необхідна для обробки поверхонь поблизу шва, де концентруються напруження розтягу.

Кількість ударних елементів в голівці і їх діаметр вибирають в залежності від типу шва і міцності матеріалу. У якості бойків зазвичай використовують загартовані кульки і стрижні діаметром 5...6 мм і 1,5...5 мм відповідно зі сталі ШХ15.

3.2 Проковка ударниковим інструментом

3.2.1 Сутність, призначення та особливості застосування

Проковування належить до давно відомих методів зменшення поздовжніх і поперечних залишкових напружень. Вона є однією з різновидів поверхневого пластичного деформування наплавленого металу і пришовних зон зварних з'єднань з метою зміни їх механічних властивостей, форми і регулювання величини залишкових напружень. Проковування можна проводити по гарячому металу відразу після зварювання або після його охолодження. У всіх випадках осаду металу в напрямку товщини викликає розширення металу в перпендикулярному напрямку, що знижує напруги розтягнення в зоні проковки або викликає напруження стиску.

Проковування металу в холодному стані супроводжується його наклепом і поверхневим зміцненням. При цьому замість розтягуючих формуються стискаючі напруження.

При застосуванні проковки з метою зміни напружень особливу увагу слід звертати на можливість погіршення пластичних властивостей металу.

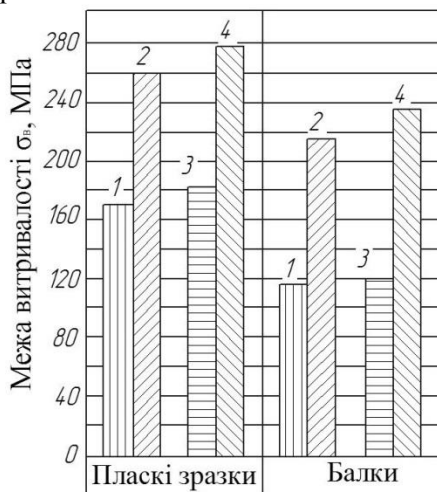
Поверхневий наклеп різних видів зварних з'єднань дробом, одно- і багатоударниковим інструментом використовують для підвищення межі витривалості зварних з'єднань.

Для прикріплення конструктивних і зв'язувальних елементів, що викликають підвищену концентрацію напружень, поверхневий наклеп істотно збільшує опір втоми з'єднань при різній асиметрії циклу.

Поверхневий наклеп призводить до виникнення стискаючих залишкових напружень або, іншими словами, знижує рівень середніх напружень, що розтягують і, отже, збільшує граничну амплітуду циклу.

Порівняльна оцінка впливу наклепу на межу витривалості

зварних з'єднань в залежності від міцності сталі приведена на рис. 3.7. Після обробки пневматичним молотком зварні зразки і балки з низьколегової сталі 15ХСНД показують трохи кращі результати, ніж аналогічні вироби зі сталі Ст3.



1 – не зміцнені зварні з'єднання низьковуглецевої сталі; 2 – наклепані; 3 – незміцнені зварні з'єднання низьколегової сталі; 4 – наклепані

Рисунок 3.7 – Ефективність поверхневого наклепу пневматичним молотком

Висока ефективність наклепу підтверджена не тільки для з'єднань з низьковуглецевих і низьколегованих сталей, а й для з'єднань з середньолегованих сталей, а також титанових сплавів.

Наклеп є також ефективним засобом підвищення опору втомі зварних балок з різного типу швами і приєднувальними елементами.

При наявності в швах внутрішніх дефектів зміцнююча обробка може виявитися марною або привести до негативних результатів, так як при наведенні в поверхневому шарі залишкових напружень стискання, внутрішні дефекти виявляються в полі залишкових напружень розтягування. У той же час вирубубання і заварювання дефектного ділянки з наступною зміцнювальною обробкою підвищують опір з'єднання втомного руйнування до рівня бездефектного.

Поверхневий наклеп багатоударниковим інструментом істотно підвищує опір крихкому руйнуванню зварних елементів в умовах низьких температур (мінус 40 °С) і повторних ударних навантажень.

Поверхневий наклеп багатоударниковим інструментом є базовою технологією післязварювальної обробки рам візків та інших вузлів рухомого складу залізниць. Цю технологію застосовують не тільки при виготовленні продукції, але і при ремонті після певного експлуатаційного пробігу.

При використанні багатоударникового інструменту для кожної конкретної звареної конструкції, виду та форми шва важливе значення має правильний вибір енергії удару, діаметра дроту і їх число в пучку, а також оптимальний режим зміцнення.

Досвід багаторічного промислового використання поверхневого наклепу підтвердив його високу ефективність для підвищення опору втоми різноманітних машин і споруд (зварні кранові і мостові конструкції, зварні рами рухомого складу залізниць, гребні суднові вали з наплавленнями, деталі з ремонтними звареннями і наплавленнями).

Одним з напрямків підвищення корозійної стійкості зварних з'єднань є зниження різними способами залишкових напружень, в тому числі за рахунок поверхневого наклепу.

Структура металу, що створена в результаті пластичної поверхневої деформації, характеризується великим опором втоми на повітрі і в корозійному середовищі в порівнянні з об'ємним пластичним деформуванням.

Проковування зварних з'єднань також використовується і для стабілізації геометричних розмірів зварних з'єднань.

3.2.2 Технологічні особливості

На перших етапах проковку здійснювали за допомогою карбування одноударниковим інструментом. Однак при використанні звичайних одноударникових інструментів у виді пневматичного молотка продуктивність карбування була низькою.

Найбільш прийнятним для з'єднань з необробленої після зварювання поверхнею швів виявився наклеп багатоударниковим (пучковим) інструментом.

Твердість поверхневого шару пластин зі сталі Ст3 в результаті зміцнення багатоударниковим інструментом збільшується з 127 HV до

150 НV (приблизно на 20%). Глибина залягання залишкових стискаючих напружень становить близько 2,5 мм, а їх максимальна величина досягає 250...300 МПа.

Перевагою багатоударникових інструментів в порівнянні з одноударниковими є можливість обробки швів з великими нерівностями; западини на нерівній поверхні так само добре проклепуються, як і виступи. Така можливість у багатоударникових інструментів проявляється в зв'язку зі значною довжиною (100...180 мм) дротів, що становлять пучок, і різним ступенем їх подовжнього вигину.

Обробку багатоударниковим інструментом виконують без пропусків до появи металевого блиску всій оброблюваній поверхні зварного шва і пришовної зони.

Ступінь наклепу визначається силою удару, діаметром дроту в пучку, числом і швидкістю нанесення ударів по оброблюваній площі. Чим вище енергія удару, тим більше наклеп.

У свою чергу, з підвищенням тиску повітря, що надходить в багатоударниковий інструмент, енергія удару і початкова швидкість удару зростають.

При постійній енергії одиничного удару і збільшенні частоти ударів ступінь деформації зростає. Збільшенню наклепу сприяє зростання швидкості нанесення ударів і зменшення діаметра дроту в пучку.

Поверхневу обробку зварних з'єднань багатоударниковим інструментом проводять з дотриманням наступних вимог:

– наклепу піддають поверхні зварного шва і пришовної зони основного металу елемента конструкції на ширину 15...20 мм;

– перед зміцненням ділянки зварних швів і прилегли до них зони основного металу повинні бути очищені від шлаку, іржі та бризок металу, а підрізи усунені;

– при наклепі інструмент слід тримати якомога перпендикулярно до зміцнюючої поверхні і повільно переміщати по шву з тим, щоб наклеп на оброблюваній поверхні був рівномірним, без помітних пропусків, а поверхня була блискучою в суцільних дрібних лунках. Особливу увагу необхідно звертати на якість наклепу в місцях переходу від зварного шва до основного металу;

– якість наклепу визначають візуально і порівнянням з

контрольним еталоном, а також за часом наклепу; практично визначено, що час наклепу 1 пог. м шва становить приблизно 12...15 хв.;

–при наклепі тиск стисненого повітря в магістралі має бути 0,4...0,5 МПа, що контролюють за манометром, встановленим по можливості ближче до місця наклепу.

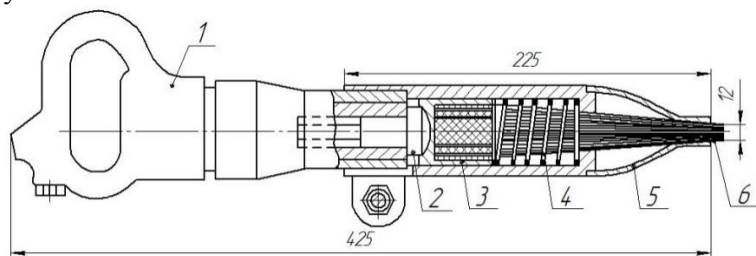
Проковування можна проводити і по гарячому металу. Таку технологічну операцію зазвичай використовують при зварюванні багатошарових швів з метою зменшення напруги і деформацій. Проковування шарів при заповненні оброблення (сталь 20, дугове зварювання в CO_2) не призводить до помітного зниження напружень в корені шва, але значно знижує деформації звареної конструкції (до 30...40 %).

Проковування по гарячому металу виконують після попереднього очищення шлаку (крім першого і останнього шарів) тупим зубилом з радіусом притуплення 2...3 мм. Проковування можна проводити при температурі металу шва 450 °С і вище або 150 °С і нижче.

До недоліків обробки ударниковим інструментом слід віднести невисоку продуктивність і підвищений рівень шуму.

3.2.3 Устаткування

На рис. 3.8 показана схема одного з багатоударникових інструментів.



1 – пневматичний молоток; 2 – ударник; 3 – стакан; 4 – пружина; 5 – наконечник; 6 – пучок голок

Рисунок 3.8 – Схема багатоударникового (пучкового) пневматичного інструменту

На пневматичний молоток 1 посаджений корпус з наконечником 5. Пучок зміцнюючих голок 6 розміщений всередині склянки 3. З боку зіткнення голок з бойком 2 кінці голок розклепують, що запобігає їх випадання під час роботи інструменту. Розміри голок і втулок вибирають в залежності від типу молотка, використовуваного для зміцнюючої обробки зварного з'єднання. Голки, проходячи через наконечник 5, збираються в один пучок. Бойок 2 під дією стисненого повітря надає голкам поступальний рух, а спіральна пружина 4 повертає їх в початкове положення. Таким чином, ударник у виді пучка дроту завдає сильні і часті удари по оброблюваній поверхні і здійснює зміцнюючий наклеп зварного шва і пришовної зони.

Для зміцнюючих голок використовують пружинний дріт зі сталі 65Г діаметром 1,2...3 мм із загартуванням на твердість 45...50 НРС. Багатоударникові зміцнителі дозволяють отримати глибину наклепаного шару близько 3 мм для сталей середньої твердості.

Продуктивність при роботі одним багатоударниковим інструментом при ширині зони наклепу 18...20 мм становить 6...8 пог. м/год. У разі необхідності процес обробки багатоударниковим інструментом може бути механізований.

Маса ручного багатоударникового інструменту може становити від 2 до 11 кг.

3.3 Обкатка

Пластичні деформації укорочення, що виникають при зварюванні в зоні шва і в пришовній зоні, призводять, до місцевого залишкового вкорочення в поздовжньому напрямку. Для зняття напружень в зварному шві кожне поздовжнє волокно зони пластичних зварювальних деформацій необхідно подовжити рівно настільки, наскільки воно коротшало при зварюванні. Так як всі укорочення волокон поперечного перерізу шва мають різну величину, то для повного усунення напружень їм повинна бути надана і різна величина деформацій подовження. Здійснити таку нерівномірну за поперечним перерізом зварного з'єднання деформацію неможливо жодним з існуючих методів за винятком високотемпературного відпускання зварної конструкції.

Необхідна точність зварної конструкції може бути забезпечена і тоді, коли залишкові напруги раціональним чином перерозподіляться за поперечним перерізом зварного з'єднання. Цей перерозподіл досягається осадом при обкатці деякої частини зони пластичних деформацій по товщині. В результаті осаду відбувається рівномірне подовження металу і компенсація зварювальних деформацій укорочення деформаціями подовження. Обкатка може здійснюватися за один або кілька пропусків обкочуваної зони між деформуючими роликками, причому багатопрохідна обкатка передбачає перш за все збільшення ширини обкочуваної зони, а не збільшення деформації в одній і тій же зоні повторним деформуванням.

Залежно від співвідношень ширини роликків і ширини зони залишкових пластичних деформацій можливі кілька варіантів зміни епюр залишкових напружень в зварних швах. З рис. 3.9 видно, що при зміні ширини обкочуваної зони для усунення деформацій потрібне більше або менше зниження напружень. Причому, якщо обкатці піддається зона ширша, ніж зона зварювальних пластичних деформацій, усунення напружень може бути і неповним. Для цього потрібні менші зусилля, ніж при усуненні деформацій обкаткою тільки по шву, але процес здійснюється за три-чотири проходи - обкаткою по шву та по пришовній зоні.

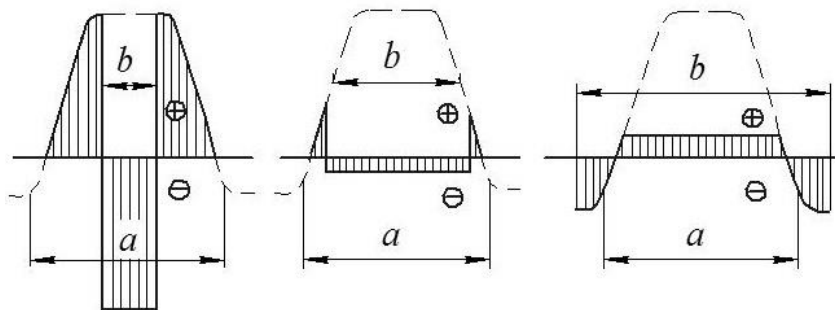


Рисунок 3.9 - Епюри напружень при різних співвідношеннях між шириною обкочуваних зон b і шириною зони пластичних деформацій a

Розрізняють два призначення прокатки:

- для усунення залишкових напружень та деформацій;
- для зміцнення шва і загладжування концентраторів напружень в зварних швах.

Усунення зварювальних деформацій і напружень досягається при досить малому ступені деформації зварного шва і пришовної зони

по товщині, що становить десяті частки відсотка.

У всякому разі для матеріалів, у яких залишкові напруження в зоні зварювання мають величини, близькі до межі текучості σ_T .

Загладжування посилення і зміцнення металу шва здійснюється при значно більших зусиллях на деформуючих роликах і при ступенях деформації в кілька відсотків. Цей процес знаходить застосування при виготовленні оболонок з високоміцних сталей, а також алюмінієвих сплавів, що знеміцнюються при зварюванні. Його здійснення не вимагає дотримання багатьох технологічних тонкощів, характерних для процесу обкатки зварних з'єднань з метою усунення залишкових деформацій і напружень, таких - як збереження сталості на роликах під час обкатки, визначення ширини зони обкочування, числа проходів та інш.

На пластичну деформацію при обкатці зварного з'єднання та його пришовної зони істотно впливають: зусилля на ролики, діаметри та ширина робочого паска роликів; товщина металу в зоні прокатки; межа текучості та модуль пружності матеріалу; напруження в металі перед обкаткою; жорсткість виробу або вузла, що обкатується.

3.4 Дробоструминний наклеп

3.4.1 Сутність та призначення

Дробоструминний наклеп відносять до способів поверхневого пластичного деформування. При ньому відбувається перетворення енергії стисненого повітря в кінетичну енергію металевго дробу. Струмін дробу характеризується швидкістю і кутом розсіювання. Просторовий кут розсіювання струменя дробу з сопла дробоструминного апарату є постійною величиною, що становить 28...30°. Швидкість дробу залежить від тиску стисненого повітря і конструкції сопла і може досягати 70 м/с.

Дробоструминний наклеп використовують для тих же цілей, що і проковку зварних з'єднань. Дробоструминний наклеп сталі дозволяє отримати глибину наклепаного шару до 0,5...0,8 мм. На товщину наклепаного шару впливає розмір дробу, який класифікується згідно ДСТУ 3184-95.

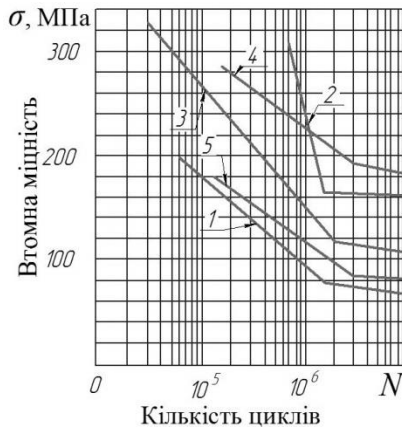
Глибина наклепу зростає зі збільшенням тиску повітря і кута

атаки дробу (кут між віссю струменя дробу і оброблюваною поверхнею), досягаючи найбільшого значення при постійних параметрах і значеннях кута атаки, близьких до 90° .

При подальшому мікроударному впливі частинок дробу на наклепану поверхню може спостерігатися явище «перенаклепу», що виникає при нездатності кристалічної решітки до подальшого зміцнення. Метал розпушується, з'являються тріщини, спостерігається відшаровування та ін. Перенаклеп - явище незворотне, тому його необхідно уникати.

Перевагою дробоструминного наклепу в порівнянні з проковуванням ударним інструментом є більш висока (приблизно в 2,5 рази) продуктивність і менший шум.

На рис. 3.10 наведені результати випробувань з втомленості зварних сталевих зразків після дробоструминної обробки на різних режимах. Ці дані показують, що поверхневе зміцнення зварних з'єднань дозволяє підвищити циклічну довговічність конструкцій в 2...3 рази. Для забезпечення необхідної корозійно-втомної міцності суднобудівних металоконструкцій ширина зони дробоструминної обробки повинна становити близько 60 мм на одну сторону від зварного шва.



- 1 - без обробки; 2-4 – після дробоструминної обробки (2 - $P = 0,50$ МПа, $t = 60$ с;
3 - $P = 0,55$ МПа, $t = 5$ с; 4 - $P = 0,55$ МПа, $t = 15$ с); 5 - після індукційного нагріву

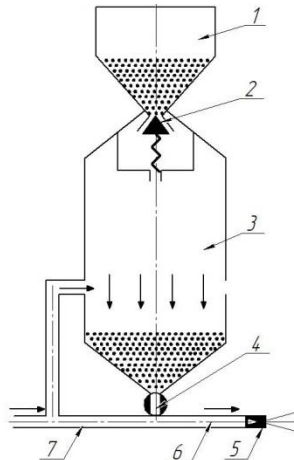
Рисунок 3.10 - Криві втоми сталі

Технологія дробоструминного наклепу поряд зі зміцненням багатударниковим інструментом і ультразвуковою обробкою відноситься до базових технологій суднобудування.

3.4.2 Устаткування

Для дробоструминної обробки використовують апарати двох типів: *нагнітального* і *всмоктуючого*. В апаратах нагнітального типу (рис. 3.11) дріб з живильного бункера 1 через клапан 2 періодично подається в камеру 3, що знаходиться під тиском стисненого повітря. З камери дріб надходить в змішувач 4, де її підхоплює потік повітря, що надходить із магістралі по трубопроводу 7. Суміш повітря з дробом по шлангу 6 надходить до сопла 5 і потім у вигляді струменя спрямовується на оброблювану поверхню.

Струменеві апарати нагнітальної дії ділять на апарати періодичної і безперервної дії. Апарати періодичної дії (див. рис. 3.11) мають робочу камеру, в яку засипають певну порцію дробу. Після витрачення дробу апарат перезаряджають, для чого знижують тиск в робочій камері до атмосферного, відкривають клапан 2 і засипають нову порцію дробу.

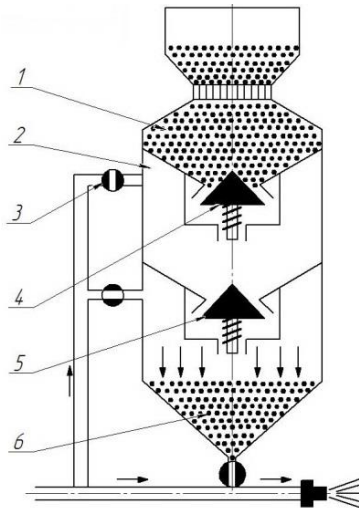


- 1 - живильний бункер; 2 - клапан; 3 - камера; 4 - змішувач; 5 - сопло; 6 - шланг;
7 - трубопровід

Рисунок 3.11 - Схема дробоструминного апарату нагнітального типу періодичної дії

Використання апаратів безперервної дії або двокамерних дозволяє виключити зупинки технологічного процесу для наповнення камери дробом. У таких апаратах дріб засипають з бункера 1 (рис. 3.12) у верхню камеру 2 через клапан 4.

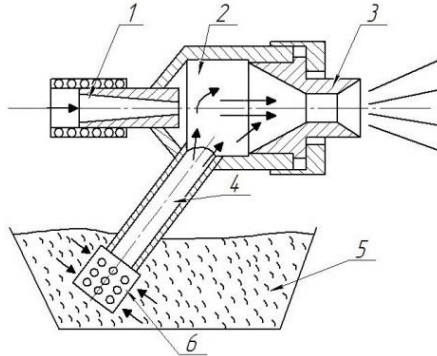
Коли абразив в нижній робочій камері 6 закінчується, у верхній камері відкривається вентиль 3 і створюється тиск, що дорівнює тиску в робочій камері. Клапан 4 під дією тиску у верхній камері закривається, надходження дробу припиняється. Клапан 5 зважаючи рівності тисків в камерах 2 і 6 відкривається, і дріб під дією сили тяжіння з верхньої камери пересипається в робочу, після чого тиск у верхній камері скидають, клапан 5 під дією надлишкового тиску в робочій камері замикає горловину і припиняє доступ дробу в робочу камеру. З бункера чергова порція дробу через клапан 4, що відкрився під дією сили тяжіння, надходить у верхню камеру - і процес повторюється.



1 - бункер; 2 - верхня камера; 3 - вентиль; 4, 5 - клапани; 6 - нижня робоча камера
Рисунок 3.12 - Схема двокамерного дробострумінного апарату

В апаратах всмоктуючого типу (рис. 3.13) струмінь повітря, що виходить з сопла 1, створює в камері-змішувачі 2 і патрубок 4 розрідження, в результаті чого в патрубок через отвір в насадці 6 засмоктується атмосферне повітря, що переміщає дріб з бункера 5 в камеру - змішувач. Потік повітря з сопла 1 підхоплює дріб, направляє її в сопло 3 і з нього у виді струменя подає дріб на оброблювану поверхню.

Апарати всмоктуючого типу мають більш просту конструкцію, надійні в роботі, але дещо менш продуктивні, ніж апарати нагнітального типу.



1 - сопло; 2 - камера-змішувач; 3 - вихідне сопло; 4 - патрубок; 5 - бункер; 6 - насадка
Рисунок 3.13 - Схема дробоструминного апарату всмоктуючого типу

4 ІМПУЛЬСНІ ТА ВІБРАЦІЙНІ СПОСОБИ ОБРОБКИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

4.1 Вібраційна обробка

4.1.1 Фізична сутність та призначення

При вібронавантаженні складають змінні напруження σ_A із залишковими σ_z в металоконструкції (рис. 4.1). Під дією сумарних напружень σ_x може відбуватися пластична деформація, що сприяє стабілізації геометричних розмірів, перерозподілу і зниження залишкових напружень.

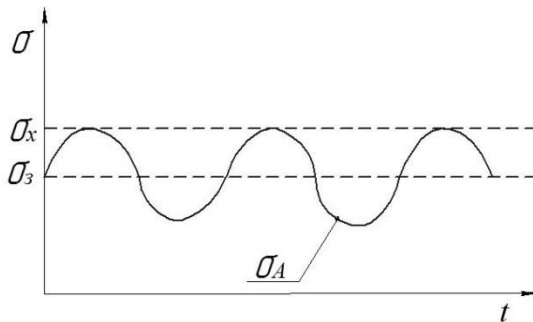


Рисунок 4.1 - Схема складання залишкових і вібраційних напружень в металоконструкції

Якщо напруження σ_x малі, то макропластичні деформації металу зварного з'єднання не відбуваються, а отже не може відбуватися істотний перерозподіл і зниження залишкових напружень першого роду. Після обробки на таких режимах внаслідок анігіляції знижується загальна щільність рухливих дислокацій, а дислокації, які залишилися, виявляються настільки закріпленими, що для їх зсуву з місця необхідно значне зусилля. В цілому це підвищує опірність металу зварного з'єднання подальшому мимовільному деформуванню.

Вібрація зварних конструкцій при низьких рівнях створюваних напружень ($>0,05\sigma_T$) незначно впливає на зміну залишкових напружень першого роду. У той же час відбувається істотне підвищення стабільності геометричних розмірів завдяки перерозподілу щільності дислокацій і зміни напружень другого роду.

При високих значеннях напружень σ_A в металі спостерігають лавиноподібне виникнення нових дислокацій, навіть незначне переміщення яких призводить до різкого збільшення незворотного деформування. Внаслідок цього сумарні напруження σ_x істотно перевищують межу плинності металу σ_T . Таким чином, основним процесом, що відбувається в металі зварного з'єднання, буде макропластичне деформування, що призводить як до перерозподілу і зменшенню залишкових напружень, так і до його зміцнення.

Віброобробка зварних зразків з низьковуглецевої сталі на режимах, що забезпечують перебіг пружно-пластичних деформацій, зменшує напруження першого роду, виміряні тензотермічним методом, на 50...60 %, а відпускання - на 70 % і більше. Напруження другого роду в зоні з'єднання, визначені рентгенівським методом, після віброобробки знижуються на 45 %, а після відпускання - на 65 %. Зменшення щільності дислокацій при віброобробці і відпусканні практично однаково.

Вібраційну обробку застосовують для стабілізації геометричних розмірів зварних металоконструкцій шляхом збудження в зварній конструкції низькочастотних механічних коливань.

Вібраційній обробці піддають зварні конструкції не тільки з вуглецевих сталей, а й виготовлені з алюмінієвих і титанових сплавів. Широко використовують віброобробка чавунних і сталевих виливків.

За енергоємністю вібростабілізація в десятки разів нижче термічної обробки, а по продуктивності значно її перевершує. Приблизно на порядок знижуються і капітальні витрати.

4.1.2 Схеми вібраційної обробки

Ефективність систем віброобробки визначають схемою збудження коливань в зварних конструкціях. Набули поширення такі принципи схеми збудження коливань, що передбачають: установку деталей на віброопорах (рис. 4.2 а); підвішування деталей на гаку (рис. 4.2 б); розміщення деталей на вібростенді (рис. 4.2 в); обробка в статично навантаженому стані з накладенням вібрацій (рис. 4.2 г).

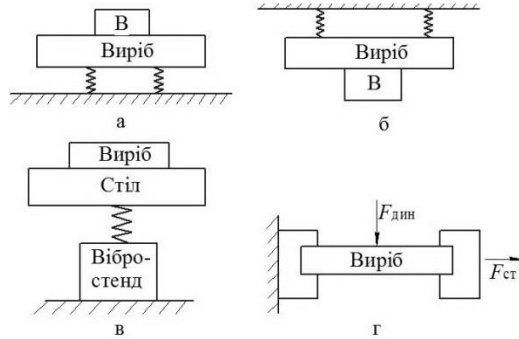


Рисунок 4.2 - Схеми установки виробу і вібровозбуджувача (В)

Найбільше застосування при віброобробці зварних конструкцій отримала схема з використанням віброопор.

Опори здійснюють коливання з максимальною амплітудою, завдяки малій поверхні зіткнення з деталлю і малому демпфуванню. Важливе значення для досягнення високих амплітуд мають оптимальне визначення вузлів коливання, які спостерігаються в умовах резонансу і являють собою лінії з малими переміщеннями, а також установка на даних лініях опор і вібровозбудника.

Вузлові лінії являють собою ділянки виробу, в яких практично відсутня вібрація в момент резонансу, тобто це лінії, навколо яких відбуваються коливання. Їх визначають за допомогою вібровимірювальних приладів, а також шляхом засипання на поверхню оброблюваної деталі піску або іншого зернистого матеріалу, який під дією коливань збирається на вузлах.

Шляхом раціонального розташування опор і збудника можна домогтися підвищення рівня енергетичного впливу на оброблювану зварну конструкцію.

Вібровозбудник встановлюють на поверхні деталі таким чином,

щоб вісь обертання валу залишалася горизонтальною, а напрямок хвиль коливань - паралельно основним зварним швам. Правильність установки віброзбудника визначають наявністю резонансу системи «віброзбудник-оброблювана деталь» в діапазоні його частоти. При відсутності резонансу необхідно змінити місце установки віброзбудника. Якщо при неодноразовій зміні місця установки віброзбудника явище резонансу не виявляються, збільшують зусилля збудження вібратора або розширюють діапазон частот впливу застосуванням відповідних віброустановок.

У підвішеній деталі (рис. 4.2 б) легко збуджуються всі форми коливань, так як немає впливу опор і немає необхідності міняти місце їх установки. Зазначений спосіб ефективний при віброобробці жорстких деталей з високочастотними резонансами, де навіть незначне демпфірування опор впливає на якість віброобробки.

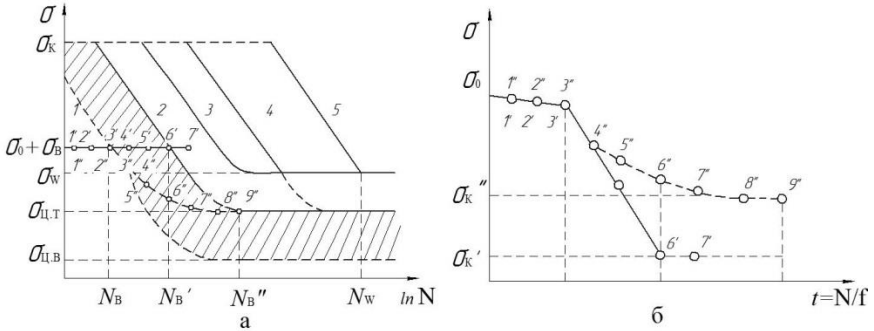
Віброобробка малогабаритних деталей здійснюється на вібростендах електродинамічного і електромагнітного типу або на спеціально обладнаних пружно підвішених столах з дебалансними віброзбудник (рис. 4.2 в). До рухомого столу вібростенда деталь кріплять жорстко, через пружні елементи так, щоб лінія кріплення проходила через вузол.

Схеми вібраційної обробки з попередніми статичним навантаженням (рис. 4.2 г) не отримали широкого промислового застосування.

4.1.3 Вибір режимів віброобробки зварних конструкцій

Основними параметрами вібраційної обробки є амплітуда, час або кількість циклів вібронавантаження. Чим вище амплітуда змінної напруги, тим інтенсивніше відбувається релаксація залишкових напружень. Від правильного вибору цих параметрів залежать якість віброобробки і довговічність виробів, оскільки вібронавантаження здійснюють на резонансних частотах, які можуть викликати пошкодження конструкції.

Обґрунтований вибір режимів віброобробки може здійснюватися на основі узагальненої діаграми втоми металу (рис. 4.3).



1 - початок мікроскопічної течії; 2 – макроскопічна течія; 3 - лінія закінчення макроскопічної течії; 4 - лінія початку субмікроскопічних тріщин; 5 - крива втомного руйнування; σ_k - критичне напруження втоми; $\sigma_{\text{ц.т.}}$ - межа втоми; σ - циклічна межа втоми;

Рисунок 4.3 - Схема узагальненої діаграми втоми металів (а) та кінетика зменшення залишкових процесів (б)

При вібраційній обробці на стадії циклічної мікроплинності до лінії 2 (рис. 4.3 а) звичайні механічні властивості (межа плинності, мікротвердість та ін.) не змінюються і до її закінчення; при циклічному напруженні, рівному межі втоми, весь перетин матеріалу зазнає невелику деформацію (експериментально встановлено, що при тривалості N віброобробки не більше 10^4 циклів фіксується відносна деформація порядку $10^{-6} \dots 10^{-4}$).

Початок інтенсивної мікропластичної течії встановлюється по зміні характеристики внутрішнього тертя і позначено на кривою 1 (рис. 4.3 а); області плинності розмежовані кривою 2; криві 3, 4 і 5 відображають відповідно стадії циклічного зміцнення, утворення субмікроскопічних тріщин і втомного руйнування.

У низьковуглецевій сталі стадія циклічної течії пов'язана з протіканням по всьому об'єму матеріалу макроскопічної пластичної деформації, що характеризується різким збільшенням щільності дислокацій по границях зерен в перліті і навколо включень, протіканням поперечного ковзання і початком формування комірчастої дислокаційної структури. Крім того, змінюються деякі фізико-механічні властивості: підвищується мікротвердість, знижується межа пропорційності, відбувається зміна характеристик внутрішнього тертя та ін. Процес зменшення залишкових напружень на тлі сумарних залишкових і вібраційних напружень починається з лінії 1 (початок мікроскопічного течії) і закінчується лінією 2 (початок

макроскопічного течії). Сумарні значення залишкових і вібраційних напружень ($\sigma_3 + \sigma_B$) повинні бути менше критичних напружень втоми σ_K .

Наявність побудованих для певного матеріалу кривих 1, 2 і 3 на діаграмі втоми дозволяє обґрунтовано вибирати режими віброобробки. Перебіг процесу вібраційного зменшення напружень при сумарному значенні залишкових і вібраційних напружень, меншому статичної межі плинності, розглядають наступним способом. Як правило, віброобробку проводять при додаванні вібраційних напружень $\sigma_B = \text{const}$. На узагальненій діаграмі втоми (рис. 4.3 а) відкладають сумарне значення залишкових і вібраційних напружень $\sigma_3 + \sigma_B$. До початку мікроскопічної течії (крива 1) зменшення залишкової напруги майже не відбувається. Через N_B циклів, число яких залежить від сумарного значення залишкових і вібраційних напружень, починається пластична деформація, внаслідок чого залишкові напруги зменшуються, що відповідає точкам 4"-8" (рис. 4.3). При досягненні лінії початку макроскопічної течії (точка 9") віброобробку необхідно припинити. Точка 9" відповідає N_B'' циклам. Час віброобробки визначають діленням числа циклів N_B'' на частоту f вібраційного впливу:

$$t_{\text{обр}} = N_B'' / f.$$

Визначивши по осі ординат значення $\sigma_0 + \sigma_B$, відповідне точці 9" (наприклад, $\sigma_3 + \sigma_c \sigma_{yT}$), знаходять значення σ_K'' , до якого вдається знизити віброобробкою залишкові напруги

$$\sigma_{yT} - \sigma_B = \sigma_K''.$$

Таким чином, завдяки нерівномірному розподілу залишкових напружень в зварних конструкціях, ступінь зменшення залишкових напружень в різних точках виробу буде різною через мінливості сумарного значення залишкових і вібраційних напружень $\sigma_3 + \sigma_B$.

Можливий випадок, коли в процесі віброобробки для зменшення залишкової напруги збільшують σ_B , щоб сума залишкових і вібраційних напружень лишалася незмінною ($\sigma_3 + \sigma_B = \text{const}$). При цьому швидкість зменшення залишкових напружень підтримується

також постійно. (точки 3'...6'), внаслідок чого досягається найбільш повне зниження залишкових напружень. На практиці підбір режимів віброобробки здійснюють експериментальним шляхом.

4.1.4 Устаткування для віброобробки

Сучасні системи віброобробки зварних конструкцій використовують резонансний спосіб навантаження. В умовах резонансу режим вібрації забезпечує виникнення в металоконструкціях високих амплітуд динамічних напружень при мінімальних енергетичних витратах. Віброзбудник використовують з меншою силою збурення, виграючи в габаритних розмірах і масі всього вібропристрою.

На рис. 4.4 наведена найбільш поширена схема системи віброобробки зварних конструкцій.

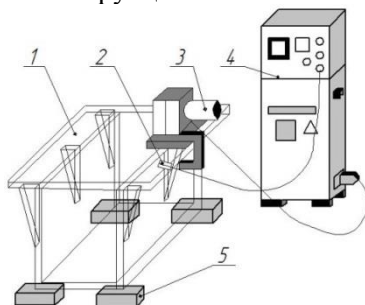


Рисунок 4.4 - Схема вібраційної обробки зварних конструкцій

Зварна конструкція 1 встановлена на віброізолюючих опорах 5, до неї прикріплено струбцинами або болтами віброзбудник 3 з регульованою частотою коливань. На пульті управління 4 віброустановки розташовані прилади, що реєструють частоту і амплітуду коливань за допомогою датчика 2, прикріпленого до зварної конструкції. Плавною зміною частоти коливань від мінімальної до максимальної реєструють резонансні частоти системи «зварна конструкція-віброзбудник». Потім здійснюють віброобробку на обраних резонансних частотах.

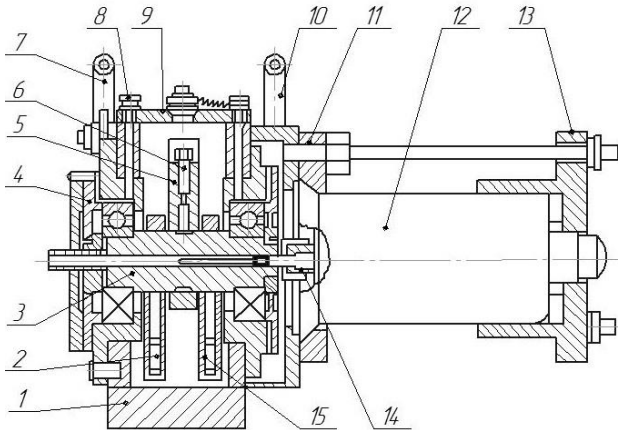
Системи, які призначені для віброобробки, розрізняють за типом застосовуваного віброзбудника, визначальними параметрами якого є

частотний діапазон, амплітуда, зусилля збурення.

Для віброобробки металоконструкцій найбільшого поширення набули механічні інерційні віброзбудники.

Віброзбудник вибирають в залежності від особливостей процесу віброобробки.

У якості вібраційного приводу найбільш широкого поширення набули дебалансні збудники (рис. 4.5). Створювана віброзбудником даного типу сила збурення істотно залежить від частоти обертання. Регулювання сили здійснюють в зупиненому віброзбуднику зміною кута між неврівноваженими масами і сумарної маси дебалансів.



1 - зварений корпус; 2, 5, 15 - дебаланси; 6 - гвинт; 7; 10 ручки; маслянка; 9 - верхня кришка корпусу; 11; 13 - притисні кільця; 12 - електродвигун; 14 - муфта

Рисунок 4.5 - Конструктивна схема дебалансного віброзбудника

У зварному корпусі 1 цього віброзбудника на підшипниках встановлено порожнистий вал 3, що несе три дебаланси. Два крайніх дебаланси 2 і 15 кріплять стаціонарно, а середній 5 фіксують гвинтом 6 в будь-якому кутовому положенні відносно крайніх.

Система управління забезпечує безступінчасте плавне регулювання і підтримку заданої частоти коливань, що збуджується віброблоком, дистанційне керування всіма складовими віброкомплекса, запобігання роботи віброкомплекса в неприпустимому режимі.

Дебалансні віброзбудники в основному призначені для обробки деталей великих габаритів і розвивають зусилля до $7 \cdot 10^4$ Н в частотному діапазоні до 200 Гц.

У більшості дебалансні віброзбудники використовують вібростійкі двигуни постійного струму. Проте, на деяких типах віброустановок встановлюють вібростійкі двигуни змінного струму, швидкість обертання яких регулюють за допомогою перетворювачів частоти. При цьому більш висока надійність двигунів змінного струму забезпечує збільшення ресурсу роботи віброзбудника в цілому.

Оперативний контроль режимів віброобробки в системах з дебалансними віброзбудниками здійснюють *енергетичним* (за значенням енергії, що передається в конструкцію) і *амплітудно-частотним* (по зрушенню резонансного піку) способами.

Системи віброобробки, побудовані на енергетичному способі контролю, застосовують при обробці конструкцій з широкими резонансними піками. При обробці металоконструкцій з вузькими резонансними піками можна застосовувати установки, побудовані на амплітудно-частотному способі керування.

Цей спосіб управління режимами віброобробки базується на тому, що будь-яка напружена металоконструкція має частотну характеристику з резонансними піками, частота і амплітуда яких не відповідає частотам стабілізованого виробу. У стабілізованій металоконструкції резонансні піки залишаються постійно на своїх частотах. Про закінчення віброобробки свідчить стійка амплітуда коливань протягом 2...3 хв.

Ефективність віброобробки досягається на частоті, що відповідає 1/3 амплітуди висхідній гілці резонансного піку. При цьому для обробки вибирають найвищий пік з крутим спуском. У разі відсутності явно вираженого резонансного піку з крутим спуском вибирають резонансний пік широкого профілю.

Амплітудно-частотний спосіб управління режимами віброобробки застосовують при використанні як дебалансних, так і електромагнітних віброзбуджувачів.

Системами з електромагнітними віброзбудниками можна обробляти металоконструкції в діапазоні частотою 20...1000 Гц, що значно вище діапазону, який забезпечується дебалансним віброзбуджувачем (5...200 Гц). Однак за величиною амплітуди сили збудження вони значно поступаються останнім. Проте, до переваг електромагнітних віброзбуджувачів відносять простоту конструкції, відсутність обертових і тертьових пар, підвищену надійність, відсутність необхідності в періодичному мащенні, поточному догляді,

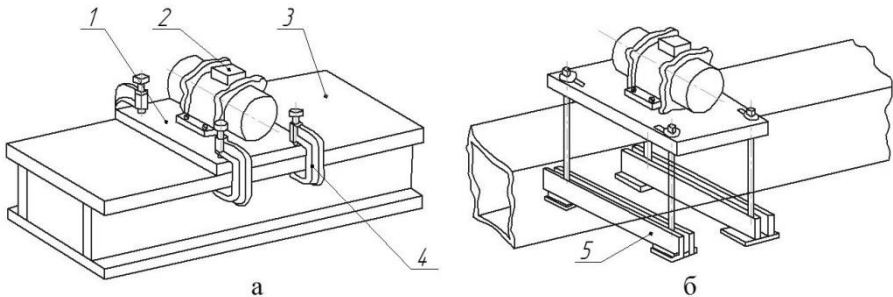
а також заміні зношених частин. Електромагнітні віброзбудники дозволяють здійснювати плавне або ступінчасте регулювання амплітуди коливань у всьому діапазоні частот - від нуля до максимального значення. При цьому необхідно підкреслити, що частота сили збудження залишається постійною при любых значеннях опору коливанням.

У конструкціях електромагнітних вібровозбудників застосовують короткоходові електромагнітні механізми з амплітудою коливань до 5 мм. Двозазорний електромагнітний віброзбудник розвиває динамічне зусилля від 10 до 2000 Н. Віброзбудники даної конструкції відрізняються тим, що можуть працювати в будь-якому просторовому положенні не змінюючи своїх характеристик.

Установки з електромагнітними і електродинамічними віброзбудниками застосовують для віброобробки деталей і вузлів, що мають резонансні частоти вище 200 Гц.

Віброопори виготовляють з литої або листової гуми з подальшим склеюванням листів для отримання необхідної товщини. Розміри опор зазвичай складають в плані не менше 50×50 мм і не більше 250×250 мм. У якості віброопор використовують зношені автомобільні шини та інші подібні гумові вироби. Мінімальна кількість віброопор становить 3 од., крім окремих випадків віброобробки балок і інших стержневих конструкцій.

Віброзбудник кріплять до виробу за допомогою струбцин з комплекту віброустановки (рис. 4.6 а). При відсутності місця на виробі, зручного для надійного кріплення вібратора струбцинами, використовують спеціальне оснащення, що дозволяє встановити і закріпити вібратор в заданому положенні (рис. 4.6 б).



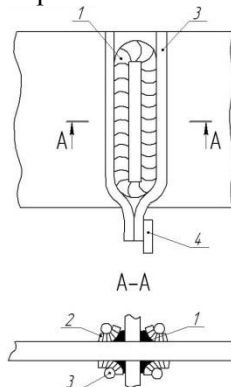
1 - плита вібратора; 2 - вібратор; 3 - виріб; 4 - струбцина; 5 - стяжні пристрій
Рисунок 4.6 - Кріплення вібраторів струбцинами (а) і стяжними болтами (б)

Однією з особливостей вібраційної обробки є те, що вібробудник (досить великої потужності) жорстко кріплять до оброблюваної конструкції. Таким чином створюється велика поверхня випромінювання коливальної енергії. В результаті спостерігається високий рівень шуму і вібрації, які можуть шкідливо діяти на обслуговуючий персонал.

4.2 Імпульсна обробка

Для створення в місцях високої концентрації напружень зварних з'єднань корисних залишкових напружень стискання та наклепу здійснюють локальне пластичне деформування поверхневого шару металу. Для цього використовується енергія ударної хвилі стискання продуктів детонації подовжених дрібних зарядів вибухової речовини, які розташовані над зонами злиття швів з основним металом.

Процес обробки здійснюється за наступною схемою (рис. 4.7). На зварних швах вздовж зони з'єднання розташовують насипну вибухову речовину – гексоген. Для пом'якшення вибухової хвилі між гексогеном та поверхнею металу наноситься шар пластиліну товщиною 2 мм. Гексоген прикріплюється до виробів також за допомогою пластиліну. Ініціювання вибуху відбувається за допомогою електродетонатора.



1 – шов; 2 – шар пластиліну; 3 – заряд гексогену; 4 - електродетонатор

Рисунок 4.7 – Схема розташування зарядів на зварному з'єднанні з поперечними кутковими швами

Імпульсна обробка зони зварних з'єднань з низьковуглецевих та низьколегованих сталей підвищує твердість в поверхневому шарі металу на 45...60 % в порівнянні з основним металом. В залежності від кількості заряду глибина наклепаного шару складає 1...3 мм. Довговічність зразків після імпульсної обробки збільшується у 5...10 разів. Стійкість з'єднань проти крихких руйнувань після обробки не знижується.

Метод імпульсної обробки зварних з'єднань для підвищення їх утомної міцності є продуктивним та дешевим у порівнянні із іншими методами. Проте для визначення раціональних галузей використання імпульсної обробки необхідно подальше уточнення її параметрів.

5 КОМБІНОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

Удосконалення технологій обробки зварних з'єднань металоконструкцій здійснюється в напрямку створення комбінованих способів, спрямованих на зниження енергоємності та підвищення продуктивності.

Комбінування може здійснюватися на принципах диференціації (роздільного виконання різних технологій на окремих робочих місцях) і інтеграції, що складається в об'єднанні кількох технологій для виконання їх на одному робочому місці. Так, принцип диференціації реалізують при комбінуванні загального і місцевого відпусків. При цьому окремі вузли (частини) звареної конструкції піддають загальному відпуску, а після їх зварювання між собою - місцевим. Зазвичай таку комбіновану технологію використовують при виготовленні великогабаритних зварних конструкцій.

Роздільну комбіновану технологію застосовують при вибухово-термічній обробці сталей. При цьому спочатку роблять обробку вибухом, що призводить до різкого збільшення щільності дислокацій, а потім виконують низькотемпературну термічну обробку. Така технологія дозволяє істотно підвищити зносостійкість сталі Г13Л, приблизно на 50 % збільшити ударну в'язкість зварних з'єднань сталі 09Г2С при низьких температурах.

Комбінування на принципах інтеграції окремих способів може здійснюватися послідовно, паралельно (одночасно) або послідовно-паралельно на одному робочому місці.

На цих принципах реалізують технологію комбінованої обробки, яка полягає в послідовному виконанні спочатку аргонодугової обробки, потім поверхневого наклепу. Початковим оплавленням границь шва усувають підрізи, істотно знижують ефект наклепу, збільшують радіус сполучення шва з основним металом, рафінують метал в зоні переплавки. Подальший поверхневий наклеп здійснюють багатоударниковим інструментом або дробоструменною обробкою. Він створює напруги стискання, які сприятливо впливають на підвищення опору втоми.

Комбіновані способи післязварювальної обробки можуть об'єднувати не тільки два способи, як це наведено в табл. 1, а й більшу їх кількість, поєднуючи принципи диференціації та інтеграції. Особливий інтерес представляють комбіновані технології, що поєднують способи, які входять у групу термічних, з віброобробкою, поверхневим наклепом багатоударниковим інструментом і дробом, а також ультразвуковою обробкою.

5.1 Спільне вібраційне і статичне навантаження

Комбінація вібраційного і статичного навантаження може бути реалізована з метою зниження напружень і усунення деформацій за допомогою вібронатяжного способу обробки. Цим способом здійснюють правку плоских металоконструкцій (наприклад, усунення залишкових деформацій бокових стінок вагону), накладаючи на поздовжні статичні розтягувальні навантаження поперечні вібраційні коливання P_v (рис. 5.1). Вібронавантаження здійснюють механічним вібратором, встановленим на конструкції в напрямку, перпендикулярному площині листа, з частотою, близькою до резонансної.

Вібраційне і статичне навантаження можна використовувати також для усунення деформацій зварних балкових конструкцій. При цьому статичне зусилля передається на балку в зоні збурювального вібраційного зусилля через пружний елемент, характеристики якого

вибираються з умови відсутності демпфірування резонансних вимушених коливань (рис. 5.2). Для досягнення ефекту правки балок довжиною L необхідно, щоб величина деформацій формозміни, викликаних вібрисловим впливом $(P_{ст} + F \cos \omega t)$, була приблизно рівна деформації формозміни в результаті зварювання.

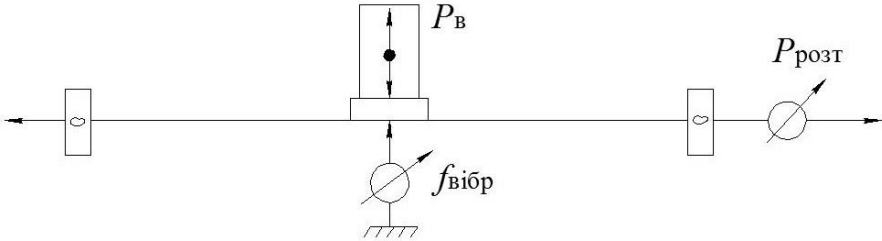
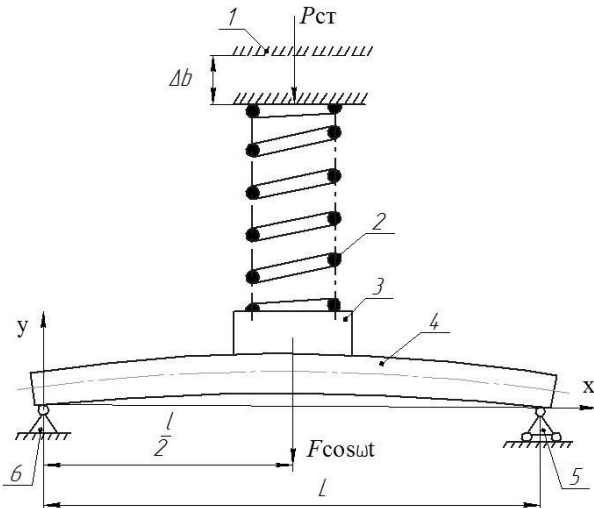


Рисунок 5.1 – Схема вібронатажного способу обробки

Завдяки раціональному поєднанню вібраційного навантаження і статичних навантажень можна повністю компенсувати залишкові деформації, що утворилися під час зварювання балок.



- 1 - навантажувальний пристрій; 2 - пружний елемент; 3 - вібратор; 4 - зразок;
5 - рухома опора; 6 - нерухома опора

Рисунок 5.2 - Схема навантаження для виправлення деформацій поздовжнього вигину

5.2 Вібронавантаження з нагрівом

Віброобробка з одночасним нагрівом інтенсифікує процес зниження залишкових напружень. Під впливом нагрівання підвищується дифузійна рухливість атомів, що утворюють кристалічну ґратку, а вплив на нагрітий метал механічних коливань сприяє підвищенню термодинамічної стійкості системи. При цьому інтенсивніше відбувається перерозподіл і зменшення внутрішньої напруги внаслідок локальних пластичних мікродеформацій.

Зменшення внутрішніх напружень залежить від частоти. Наприклад, вібраційно-термічна обробка литих зразків ливарних решіток зі сталі 35Л показує, що при амплітуді коливань 0,2 мм і частоті 80 Гц залишкові напруги на 20 % менше, ніж після аналогічного нагріву без вібрації. При частоті 150 Гц вони зменшуються в 3,6 рази, при частоті 250 Гц - в 4,1 рази. Зниження внутрішніх напружень в цих умовах підпорядковується залежності:

$$\sigma = \sigma_0^{-0,1\alpha\Theta ft},$$

де σ - залишкові напруги;

σ_0 - внутрішня напруга в металі до нагрівання і вібронавантаження;

α - коефіцієнт термічного розширення;

Θ - температура нагріву;

f - частота вібрацій;

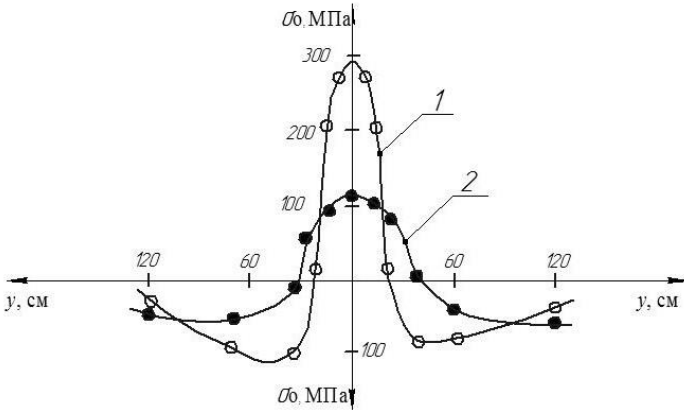
t - час обробки.

Після аргонодугової обробки максимальні напруження знижуються на 25 %. Застосування одночасного вібронавантаження з аргонодуговою обробкою границь швів (тобто має місце локальне нагрівання) дозволяє знизити залишкові напруження на 60 % (рис. 5.3).

Вібронавантаження зварного виробу в процесі зварювання та після зварювання практично до його повного охолодження по ефективності зниження залишкових напружень наближається до високого відпуску (рис. 5.4).

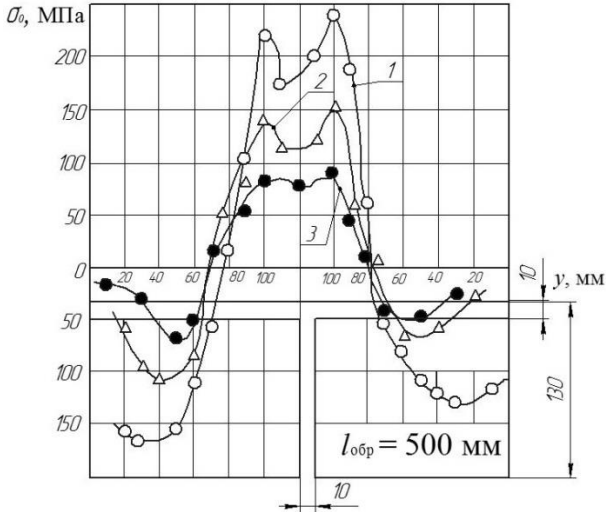
За допомогою вібрації в процесі зварювання покращують формування швів, підвищують їх стійкість проти утворення пор і

кристалізаційних тріщин, а також механічні властивості та інші експлуатаційні характеристики зварних з'єднань.



1 - після зварювання; 2 - після аргондугової обробки зварних швів з вібронавантаженням

Рисунок 5.3 – Епюри розподілу залишкових напружень в пластинах зі сталі ВСтЗсп



1 - після зварювання без вібронавантаження; 2 – після вібронавантаження в процесі зварювання і протягом 10 хв після обриву дуги; 3 - після відпускання при температурі 600 °С з витримкою в печі 2 год

Рисунок 5.4 – Вплив різних способів обробки на залишкові напруження (σ_0) в зварних зразках зі сталі ВСтЗсп товщиною 10 мм

Призначення параметрів вібронавантаження на зварний виріб в процесі зварювання здійснюють таким чином, щоб при зварюванні коливання не чинили негативного впливу на стійкість горіння дуги і формування швів.

5.3 Аргонодугова обробка і подальший поверхневий наклеп

Роздільна аргонодугова обробка і поверхневий наклеп багатоударниковим інструментом і дробом дають деякий розкид ефекту зміцнення, отриманого в зварних конструкціях одного і того ж типу. Пов'язано це як з впливом людського фактору (обидва технологічних процеси реалізують вручну), так і з недотриманням параметрів режиму обробки (коливання тиску повітря в мережі, знос інструменту та ін.).

Усунення цих недоліків сприяє комбінований спосіб зміцнення, що полягає в послідовному виконанні спочатку аргонодугової обробки, потім поверхневого наклепу. Цей спосіб рекомендують використовувати у особо відповідальних конструкціях або їх вузлах або в тих випадках, коли необхідно збільшити допустимі напруження.

Первісне оплавлення кордонів швів збільшує радіус сполучення шва з основним металом, усуває подрізи, які істотно знижують ефект наклепу та підвищує твердість поверхневих шарів оплавленої зони з вуглецевих та низьколегованих сталей в середньому на 100 HV. Це створює умови для кращого сприйняття наклепу, в наслідок якого закарбовуються дрібні пори та подрізи в оплавленій лінзі, та створюються більш високі й стійкі залишкові напруження стискання, ніж при наклепі неоплавленої поверхні. В зоні переплавки рафінується метал, знижується кількість водню і неметалевих вкраплень. Подальший поверхневий наклеп, здійснюваний багатоударниковим інструментом, створює стискувальні напруження, що роблять сприятливий вплив на підвищення опору втоми.

При використанні в комбінованій обробці багатоударникового інструменту виникає високий рівень шуму та вібрації, які негативно впливає на оператора; крім того, цей спосіб має низьку продуктивність. Усунення вказаних недоліків можливо, з забезпеченням однакового рівня підвищення циклічної витривалості

зварних з'єднань, при заміні багатударникового інструменту на дробоструминну обробку.

6 СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ОБРОБКИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

На опір втомі конструкційних матеріалів як позитивно так і негативно може впливати навколишнє середовище. Найбільший вплив має вуглеводневе середовище, яке має певну довжину вуглецевого ланцюга. Істотно змінюють втому алюмінієвих сплавів органічні середовища.

Опір втомленості металу змінюється також, якщо навколишнім середовищем є тверде тіло. Так витривалість сталевих зразків з отвором збільшується, якщо отвір заварити матеріалом з меншою границею пружності, ніж у сталі (наприклад, аустенітними електродами або електродами з бронзи).

Змінювати навколишнє середовище можна шляхом використання проміжних твердих полімерних матеріалів, які герметично покривають попередньо очищені зварні з'єднання та позитивно впливають на його витривалість. Такий матеріал повинен мати високу адгезію до металу, бути пластичним та достатньо міцним, не руйнуватися раніше металу.

Вказаним вимогам відповідають клеї, що застосовуються в промисловості для склеювання металів – епоксидні та поліефірні смоли з наповнювачами.

Використання полімерів для покриття зварних з'єднань дозволяє збільшити границю витривалості останніх на 30...200 %.

Ефект зміцнення металу та зварних з'єднань внаслідок нанесення шару пластмаси пояснюється трьома причинами: утворення залишкових напружень стискання на границі метал – клей при твердінні останнього, вирівнювання концентрації напружень та ізоляцією поверхні металу від навколишнього середовища.

Окрім нанесення полімерних покриттів, для підвищення втомі зварних з'єднань, також використовують спосіб гарячої гальванізації.

7 МЕХАНІЧНА ОБРОБКА ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

7.1 Призначення та галузь застосування

Механічну обробку зварних з'єднань у сталевих конструкціях з вуглецевої і низьколегованої сталі призначають як спосіб підвищення їх міцності, опору втомі та холодостійкості шляхом обробки зон концентрацій залишкових напружень. Особливо ефективна механічна обробка для стикових з'єднань, межа витривалості яких після механічної обробки шва зростає на 40...60 %, а в ряді випадків досягає рівня межі витривалості основного металу.

Механічна обробка швів з'єднань унапусток, утавр і з приєднаними елементами менш ефективна для підвищення їх міцності, ніж для стикових з'єднань. Механічна обробка флангових швів у з'єднань внапуск суттєво не змінює міцність з'єднання.

У напусткових з'єднаннях з лобовими швами 100 % збільшення міцності досягається лише в результаті застосування додаткових конструктивно-технологічних прийомів: використання пологих швів (співвідношення катетів 1:3,8), збільшення вдвічі проти розрахункових норм товщини накладок і додання шву увігнутого профілю при його шліфуванні.

При досить ретельній механічній обробці місць переходу від шва до основного металу в ряді випадків досягається істотне (на 58...93 %) підвищення межі витривалості при розтягуванні-стисненні таврових з'єднань. Разом з тим зачистка шва абразивним кругом в з'єднанні впритул підвищує межу витривалості при симетричному згині лише на 10 %.

Після шліфування кутових швів в місцях переходу до основного металу в елементах з поперечними і поздовжніми ребрами межа витривалості з'єднань підвищується лише на 11...20 %.

Механічну обробку зварних швів широко застосовують в машинобудуванні, суднобудуванні, області атомної і теплової енергетики, хімічної промисловості, будівництві та інших галузях народного господарства. Як частина основного технологічного процесу механічна обробка зварних з'єднань застосовується на підприємствах, що виготовляють сталеві конструкції мостів, і на будівництві - після здійснення монтажного зварювання прогонових будов залізничних, суміщених, автомобільних, міських і пішохідних

мостів. Ефективно використовують механічну обробку кутових швів і в елементах візків рухомого складу.

7.2 Основні технологічні вимоги до механічної обробки

Механічна обробка зварних з'єднань і відповідних зон в місцях зміни перерізів елементів повинна забезпечити отримання плавних переходів від металу шва до основного металу, а також від кінця привареної деталі до основного елемента конструкції або від кінця частини, що обривається, до решти перетину зварного елемента або балки. При цьому обробку слід виконувати без зайвого ослаблення перетину - на мінімальну глибину, необхідну для зняття поверхневого шару металу в зоні обробки, - до отримання чистої блискучої поверхні.

Оброблена поверхня не повинна мати рисок, розташованих поперек напрямку зусиль, що діють в елементі при його роботі. Чистота поверхні - не нижче 5 класу за ГОСТ 2789-73.

На границі зони обробки не повинно бути сходинок.

Задирки у деталей і елементів в зоні обробки повинні бути усунені зачисткою, а гострі кромки - заокруглені, з дотриманням при цьому вимог про напрям рисок.

При обробці абразивними колами не допускаються опіки металу (у вигляді чорних плям і кольорів мінливості на місцях, що зачищаються), які утворюються при сильному натисканні на абразивний круг і повільному переміщенні його по поверхні виробу.

Щоб уникнути опіків і шліфувальних тріщин, слід забезпечувати безперервний рух абразивного кола по оброблюваній поверхні і відповідним чином регулювати силу натиснення.

Виявлені в зоні обробки технологічні дефекти зварювання, а також неповне проплавлення - у випадках, коли вимога наскрізного проплавлення є обов'язковою, - повинні бути усунені.

Підрізи швів, які потрапили в зону механічної обробки, мають бути повністю вилучені.

Повинні бути також зачищені сліди газового різання, яке застосовували для видалення технологічних припусків перед механічною обробкою і для видалення вивідних планок.

При обробці зварних з'єднань ослаблення перетину по товщині прокату (поглиблення в основний метал без підварювання) поперек зусилля в елементі для всіх категорій швів, як правило, не повинно перевищувати 0,5 мм на металі товщиною до 20 мм і 3% товщини - на більш товстому металі; при цьому на 20 % довжини оброблюваної зони допускається ослаблення перетину на глибину до 6 % товщини металу.

Поглиблення в основний метал при зачистці уздовж зусилля в елементі не повинно перевищувати 1 мм на металі товщиною до 20 мм і 6% товщини - на більш товстому металі.

У разі перевищення допустимої величини ослаблення проводиться підварювання з подальшою зачисткою з виконанням при цьому усіх вимог, що пред'являються до зон механічної обробки.

Місцеві напливи, що утворилися в місцях перекриття сусідніх ділянок шва при перерві процесу зварювання або виправленні дефектів, мають бути згладжені механічною обробкою до здійснення плавного переходу від напливу до перетину шва проектного розміру і до основного металу.

7.3 Контроль якості механічної обробки

Оцінювання якості оброблених зварних з'єднань у сталевих конструкціях здійснюється візуальним способом із застосуванням в необхідних випадках еталонів, найпростіших вимірювальних інструментів і шаблонів.

Контролюють наявність обробки в усіх зонах обробки.

Якість обробки визнається задовільною, якщо оглядом зони обробки встановлено:

а) повне зняття прокатної окалини, а також окисленого поверхневого шару протягом заданої зони обробки з чистотою не нижче 5 класу по ГОСТ 2789-73, перевіряється за стандартами;

б) плавність (з заданим радіусом) переходів від металу оброблюваного шва, деталі або частини перерізу;

в) відсутність на обробленій поверхні надривів і тріщин, а також ризок, розташованих поперек напрямку зусиль, що діють в елементі при його роботі;

г) відсутність в зоні обробки послаблень перетину, що перевищують встановлений нормами допуск;

д) відсутність у деталей і елементів в зоні обробки гострих кромки і задирок;

е) відсутність на обробленій абразивним кругом поверхні підпалів металу у виді чорних плям і кольорів мінливості, а також шліфувальних тріщин;

є) відсутність в зоні обробки технологічних дефектів зварювання (тріщин, несплавлень, пор, шлакових включень, підрізів, а також неповного проплавлення товщини деталі у випадках, коли вимога наскрізного проплавлення є обов'язковою);

ж) відсутність слідів прихоплень, що прикріплюють вивідні планки і складальні пристосування, а також слідів газового різання, яке застосовували перед механічною обробкою для видалення технологічних припусків, вивідних планок та інш.

Не допускається зменшення розмірів зон обробки і радіусів плавних переходів проти зазначених в технологічних інструкціях на обробку. Збільшення розмірів зон обробки і радіусів не є бракувальною ознакою.

7.4 Устаткування та інструмент

Для механічної обробки зварних з'єднань у сталевих конструкціях застосовуються абразивні кола різної твердості і крупності зерна, спеціальні абразивні каміння, а також фрези різних типів і форми, які забезпечують можливість виконання всіх вимог до обробки.

При механічній обробці широко застосовуються самохідні фрезерні трактори для зняття підсилення зварного шва, електричні та пневматичні шліфувальні машини різних типів (прямі, кутові, торцеві), пневматичні зубила. При цьому перевага віддається спеціальним переносним шліфувальним машинам і фрезерним верстатам, які забезпечують більш високу механізацію процесу обробки.

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Винокуров В.А. Отпуск сварных конструкций для снижения напряжений / В.А. Винокуров. – М.: Машиностроение, 1973. – 213 с.
2. Ефименко Л.А. Металловедение и термическая обработка сварных соединений / Л.А. Ефименко, А.К. Прыгаев, О.Ю. Елагина. – М.: Логос, 2007. – 456 с.
3. Земзин В.Н. Термическая обработка и свойства сварных соединений / В.Н. Земзин, Р.З. Шрон. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1978. – 367 с.
4. Корольков П.М. Современные методы термической обработки сварных соединений / П.М. Корольков, М.В. Ханпетов. – М.: Высшая школа, 1987. – 112 с.
5. Лащенко Г.И. Вибрационная обработка сварных соединений / Г.И. Лащенко. – К.: Экотехнология, 2001. – 55 с.
6. Лащенко Г.И. Энергосберегающие технологии послесварочной обработки металлоконструкций / Г.И. Лащенко, Ю.В. Демченко. – К.: Экотехнология, 2008 – 168 с.
7. Лившиц Л.С. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений / Л.С. Лившиц, А.Н. Хакимов. – М.: Машиностроение, 1989. – 336 с.
8. Лясоцкая В.С. Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов / В.С. Лясоцкая. – М.: Экомет, 2003. – 352 с.
9. Сагалевиц В.М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений / В.М. Сагалевиц. – М.: Машиностроение. – 1974. – 248 с.
10. Сагалевиц В.М. Стабильность сварных соединений и конструкций / В.М. Сагалевиц, В.Ф. Савельев. – М.: Машиностроение, 1986. – 264 с.
11. Хромченко Ф.А. Технология и оборудование для термической обработки сварных соединений / Ф.А. Хромченко, П.М. Корольков. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 200 с.
12. Хрупкие разрушения сварных конструкций / В. Холл, Х. Кихара, В. Зут, А.А. Уэлс. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.