



## РЕФЕРАТ

Магістерська робота за темою: «Удосконалення технології виробництва корпусних конструкцій шляхом використання вібраційної обробки зварних з'єднань»: 119 с., 25 табл., 70 рис., 147 джерел.

ВІБРАЦІЙНА ОБРОБКА, НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН (НДС), ЗВАРЮВАННЯ, ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ, АНАЛІЗ.

Об'єкт дослідження – вплив зварювальних напруг і деформацій на працездатність зварних конструкцій.

Метою даної магістерської роботи є підвищення точності виготовлення корпусів зварювальних апаратів схильних до значних деформацій внаслідок вварки патрубків.

У першому розділі розглянато вплив різних етапів технологічного процесу виготовлення на точність і рівень залишкових напружень в зварних конструкціях.

У другому розділі проведено аналіз технологічного процесу виготовлення зварних корпусів апаратів схильних до значних деформацій внаслідок впливу зварювальних напруг.

У третьому розділі проведено аналіз впливу параметрів вібраційного впливу на властивості металу зварних з'єднань.

У четвертому розділі проведено дослідження впливу вібраційної обробки конструкції на напружено-деформований стан і механічні характеристики зварних з'єднань.

У п'ятому розділі розроблена технологія виготовлення корпусу фільтра із застосуванням вібраційної обробки в процесі зварювання.

В останньому розділі розглянуто вимоги охорони праці та техніки безпеки при застосуванні вібраційної обробки в процесі зварювання.

## ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	5
ВСТУП	6
1 ВПЛИВ ЗВАРЮВАЛЬНИХ НАПРУГ І ДЕФОРМАЦІЙ НА ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	8
1.1 Вплив різних етапів технологічного процесу виготовлення на точність і рівень залишкових напруг в зварних конструкціях.....	8
1.2 Вплив залишкових напруг на працездатність апаратів, що застосовуються в нафтопереробній промисловості.....	11
1.3 Методи зниження залишкових напруг і деформацій в зварних конструкціях .....	13
1.4 Висновки по главі.....	28
2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗВАРНИХ КОРПУСІВ АППАРАТОВ СХИЛЬНИХ ДО ЗНАЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ВНАСЛІДОК ВПЛИВУ ЗВАРЮВАЛЬНИХ НАПРУГ.....	31
2.1 Загальні закономірності утворення напруг і деформацій в пролочкових конструкціях в процесі зварювальних операцій.....	31
2.2 Аналіз технологічного процесу виготовлення зварного корпусу фільтра вертикального і дослідження формування похибок форми і розмірів корпусу .....	33
2.3 Дослідження зміни овальності в процесі виготовлення сварних корпусів апаратів схильних до значних деформацій внаслідок впливу зварювальних напруг .....	43
3 АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЙНОГО ВПЛИВУ НА ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ.....	52
3.1 Аналіз впливу вібраційного впливу на властивості металу.....	52
3.2 Вплив режимів вібраційного впливу на ефективність процесу зняття зварювальних напруг і деформацій .....	53

3.3 Вибір технологічного обладнання та визначення режимів вібраційної обробки.....	59
3.4 Вибір контрольованих механічних параметрів зварних з'єднань.....	63
3.5 Планування експерименту.....	63
<b>4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІБРАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ КОНСТРУКЦІЇ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН І МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ .....</b>	<b>65</b>
4.1 Дослідження впливу вібраційного впливу на напружено-деформований стан зварного з'єднання.....	65
4.2 Дослідження впливу вібраційного впливу на механічні властивості зварного з'єднання .....	70
4.3 Дослідження впливу режимів вібраційної обробки на мікроструктуру шва і околосшовної зони.....	76
<b>5 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ КОРПУСУ ФІЛЬТРА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВІБРАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ В ПРОЦЕСІ ЗВАРЮВАННЯ.....</b>	<b>87</b>
5.1 Аналіз полученных зависимостей и особенности процесса вибрационной обработки .....	87
5.2 Розробка рекомендацій щодо удосконалення технологічного процесу виготовлення зварного корпусу фільтра.....	89
<b>6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ ПРОВЕДЕННІ НАУКОВО-ДОСЛІДНИХ РОБІТ.....</b>	<b>94</b>
6.1 Загальні вимоги охорони праці.....	97
6.2 Вимоги охорони праці перед початком роботи.....	98
6.3 Вимоги охорони праці під час роботи.....	100
6.4 Вимоги охорони праці після закінчення роботи.....	102
6.5 Вимоги охорони праці в аварійних ситуаціях.....	103
<b>ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....</b>	<b>104</b>
<b>ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....</b>	<b>105</b>

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

$H$  – мікротвердість, МПа.

$HB$  – твердість за Бринелем.

$HV$  – твердість за Вікерсом.

$HRC$  – твердість за Роквелом.

$\delta$  – відносне подовження, %.

$\sigma_m$  – межа текучості, МПа.

$\sigma_\sigma$  – межа міцності, МПа.

$\sigma_{0,2}$  – умовна межа текучості, МПа.

$\sigma_{-1}$  – границя втоми, МПа.

$\psi$  – відносне звуження, %.

$\mu$  – коефіцієнт Пуасона.

## ВСТУП

Значна частина обладнання нафтопереробних і нефтегазових підприємств паливно - енергетичного комплексу нашої країни виготовляється у вигляді зварних оболонкових конструкцій. Технологія виготовлення зварного обладнання з даного виду конструкцій посилюється тим, що в процесі виготовлення виникають значні відхилення конструкції від проектних параметрів внаслідок дії високого рівня зварювальних напруг і деформацій. Проведення термічних операцій, спрямованих на зниження негативних факторів, що вносяться зварюванням (залишкові зварювальні напруження, неоднорідність структури і механічних властивостей тощо), є енергоємним і важкодоступним технологічним процесом, особливо з урахуванням великих габаритів і складної геометричної форми даного виду обладнання. При цьому, проведені термічні операції, такі як відпустка, відпал і т. д. усуваючи залишкові напруги не виправляють повною мірою геометричну форму конструкції. Для виправлення таких дефектів необхідно використовувати більш складні і енергоємні операції термічної правки, які на деяких конструкціях через складність форми і габаритів проводити практично неможливо.

У зв'язку з тим, що значні відхилення корпусів апаратів впливають на технічні характеристики апарату і технологічні параметри процесу, стандартами та іншими нормативними документами обмежується величина відхилень, що в свою чергу підвищує трудомісткість робіт при виготовленні зварних оболонкових конструкцій, збільшує матеріальні та енергетичні ресурси.

Також відомо, що зниження технічних характеристик апаратів відбувається і в процесі їх експлуатації, що частково може бути пов'язано з низкою геометричною стабільністю зварних оболонкових конструкцій через наявність в них (в області зварних з'єднань) значних залишкових зварних напруг.

Одним з перспективних напрямів в економії матеріальних і енергетичних ресурсів є підвищення точності зварних заготовок і деталей технологічного обладнання в процесі їх виготовлення з застосуванням різного виду технологічних операцій, спрямованих на зниження рівня залишкових зварювальних напружень і деформацій.

Тому, на сьогоднішній день, враховуючи загальні тенденції розвитку машинобудівної галузі, вдосконалення технологічного процесу приготування обладнання повинно бути спрямоване не тільки на підвищення якості продукції, але і на зниження енерговитрат.

# **1 ВПЛИВ ЗВАРЮВАЛЬНИХ НАПРУГ І ДЕФОРМАЦІЙ НА ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

## **1.1 Вплив різних етапів технологічного процесу виготовлення на точність і рівень залишкових напруг в зварних конструкціях**

Технологічний процес – це частина виробничого процесу, в наслідок якого змінюється форма або фізичні властивості заготовок або окремі деталі з'єднуються в складальні одиниці [9].

Загалом, схему технологічного процесу виготовлення корпусів пристроїв можна уявити як постійно мінливу послідовність різних типів операцій: заготівельних, зварювальних, термічних, складальних і контрольних. При цьому, як показує практика, найбільш відповідальними з точки зору подальшої експлуатації зварного нафтогазового обладнання є операції саме зварювальної групи, так як при зварюванні, відбувається зниження механічних та інших властивостей металу зварних з'єднань, а так само деформування зварюваної конструкції [23, 24, 71, 121].

### **1.1.1 Точність базових деталей нафтохімічної апаратури**

Базовими, найбільш відповідальними деталями хімічних апаратів є корпус, обичайка і днище [9]. Точність базових деталей значною мірою впливає на механічну надійність, якість роботи і трудомісткість виготовлення апарату [1-2, 74]. Тому що саме корпус ізолює оброблювальну середу, піддаючись її хімічну впливу і сприймаючи при цьому механічні і теплові навантаження [9].

Переважає поширення в нафтогазовій галузі отримали суцільнозварні металеві корпуси з труб, обичайок і карт. Корпуси, особливо для апаратів з внутрішніми пристроями, збираються з високою точністю для забезпечення виконання експлуатаційних вимог [12].

При виготовленні зварних корпусів в першу чергу з необхідною точністю повинні витримуватися висота, периметр по колу і форми поперечного і поздовжнього перерізу. Точність висоти визначається точністю лінійних



з'єднань обичайок, або листових заготовок в карті. Точність периметра корпусу з карт у великій мірі залежить від похибки лінійних з'єднань листових заготовок; точність периметра корпусу з обичайок залежить від точності периметра обичайки. Для обох способів характерне наслідкове накопичення похибки на кожній операції; при виготовленні деякі похибки попередніх операцій можуть частково компенсуватись на подальших операціях, однак значна частина похибок проходить через весь технологічний процес виготовлення виробу, утворюючи сумарну похибку. Таким чином, незалежно від способу виготовлення форма корпусів спотворена: в поперечному перерізі має місце некруглість, в поздовжньому перерізі – нециліндричність [9].

До числа первинних факторів, що спотворюють форму корпусу, відносяться неперпендикулярність торця до утворює обичайки, зварювальні і теплові деформації, похибки деформації при вальцюванні і калібруванні. Найбільш поширеними способами виготовлення днищ є штампування і ротаційне видавлювання [72].

При виготовленні днищ апаратів вимоги точності пред'являються до наступних параметрів: базовому діаметру циліндричної частини, формі контуру, ухилу утворювальний циліндричної частини, розмірами і формою опуклої частини, повній висоті днища і перпендикулярності торця до осі днища [9].

Основною умовою забезпечення взаємозамінності обичайок є точність листових заготовок. У процесі отримання обичайки можуть виникати наступні похибки [9]:

$\Delta_{\text{деф}}$  - похибка деформування, що виникає при пластичній деформації в процесі вальцювання;

$\Delta_{\text{св}}$  - похибка через лінійну усадку при зварюванні;

$\Delta_{\text{р}}$  - похибка через різну довжину крайніх волокон і нейтрального шару сформованої обичайки;

$\Delta_{\text{с}}$  - похибка через допуск на товщину листового матеріалу;

$\Delta_a$  - похибка через допуск на зварювальний зазор.

Похибка  $\Delta_{\text{деф}}$  утворюється через зсув нейтрального шару внаслідок створення об'ємного напружено-деформованого стану при пластичному вигині (залежить від товщини матеріалу та периметру).

Похибка  $\Delta_{\text{св}}$  — це зменшення периметра обичайки при охолодженні зони зварювання до нормальної температури (визначається як різниця між периметрами обичайки до і після накладення поздовжнього шва). Величина випадкової складової цієї похибки залежить від способу зварювання, ширини зварювального зазору і режимів зварювання.

Похибка  $\Delta_p$  – систематична, визначається розрахунковим шляхом і залежить від товщини листа [9]:

$$\Delta p = \frac{d - d_1}{s} \quad (1.1)$$

де  $d$  - діаметр кола зовнішньої поверхні;

$d_1$  - діаметр кола внутрішньої поверхні;

$s$  – товщина листа.

Похибка  $\Delta_s$  виникає в результаті неузгодженості баз листа і обичайки.

Корпуси апаратів збирають з обичайок (стикують) на роликівих стендах, що складаються з декількох секцій роликівих опор. Через похибку установки опор вісь корпусу непрямолінійна [70].

### **1.1.2 Причини виникнення залишкових напруг і деформацій при різних технологічних операціях**

Основними технологічними операціями, при виробництві зварного обладнання ємнісного (оболонкового) типу, є операції згинання, вальцювання, різання, а так само зварювальні операції.

Виникнення залишкових напруг в процесі холодного деформування пов'язане з незворотними нерівномірними змінами обсягу металу [57].

Пояснення виникнення залишкових напруг, після пластичних деформацій, може бути проведена відповідно до положень теореми про розвантаження-залишкові напруги рівні різниці між істинними напругами в пружно-пластичному тілі і тими напругами, які здавалися б у ньому при припущенні про ідеальну пружність матеріалу [13].

Характерною особливістю залишкових напруг, що виникають в процесі механічного різання, є їх зосередженість в поверхневих шарах деталі. Причиною утворення напруг даного типу є виділення тепла в зоні контакту деталей - різець, що обумовлює значні перепади температур і виникнення залишкових напруг в приповерхневих шарах. Незважаючи на дію залишкових напруг різання в досить малих і обмежених обсягах деталі, вони роблять істотний вплив на міцність і ресурс деталі, особливо при роботі в умовах циклічного навантаження [13].

Освіта зварювальних залишкових напружень пов'язано з нерівномірністю нагріву, усадкою металевого шва і структурними фазовими перетвореннями в металі зварного з'єднання в процесі впливу термо - деформаційного циклу зварювання [9, 71].

При проведенні операції термічного різання, залишкові напруги виникають подібно зварювальним, відмінність від яких в їх низькій величині, зважаючи на можливість розвантаження.

Таким чином, в процесі виготовлення у виробі виникають і накопичуються залишкові напруження від впливу різних технологічних операцій, характерною особливістю яких є непостійність напружено - деформованого стану в процесі подальшого виготовлення або експлуатації.

## **1.2 Вплив залишкових напруг на працездатність апаратів, що застосовуються в нафтопереробній промисловості**

У відповідність з вимогами ГОСТ Р ІСО 9001-2008 якість продукції - це є сукупність властивостей продукції, що обумовлюють її придатність задовольняти певним потребам відповідно до її призначення. Однією з основних

складових якості нафтогазового обладнання оболонкового типу є експлуатаційні характеристики зварних з'єднань. Від даних показників безпосередньо залежать показники призначення і надійності обладнання в цілому. Данні показники дуже важливі з наступних причин. По-перше, показники призначення визначають область практичного застосування продукції за рахунок наявності у неї специфічних властивостей (корозійної стійкості, жаростійкості, жароміцності і т. д.). По-друге, показники надійності характеризують здатність продукції виконувати данні функції і зберігати при цьому експлуатаційні характеристики в межах даних. Тобто загальні показники призначення і надійності нафтогазового обладнання оболонкового типу залежать від аналогічних показників зварних з'єднань, як найбільш слабких ділянок з точки зору наявності дефектів, концентраторів напруг, неоднорідності властивостей металу і т. д.

Якщо для зварних виробів загального призначення працездатність і ресурс практично не залежать від рівня залишкових напружень, то для зварної нафтогазової апаратури вони безпосередньо визначають ресурс і показники надійності.

Вплив зварювальних напруг та деформацій на різні характеристики зварних конструкцій (показники призначення, надійності і т. д.) дуже різноманітно і, як вказувалося вище, залежить від марки матеріалу виробу, форм, розмірів деталі та інших конструктивних особливостей. Тому вплив зварювальних напруг і деформацій доцільно розглядати з прив'язкою до конкретного типу обладнання. Для зварної нафтогазової апаратури, значна частина якої представлена тонкостінними циліндричними оболонками, залишкові напруження і деформації можуть впливати на отримання і збереження точних розмірів і форм, а так само на технологічну міцність і працездатність конструкції [9,40, 115, 125], а саме:

- при впливі зовнішніх навантажень на виріб в процесі виготовлення, транспортування, монтажу та подальшої експлуатації власні напруги, значну частину з яких складають залишкові зварювальні, підсумовуються з напругами

від зовнішніх силових факторів, в результаті чого у виробі протікають процеси пластичного деформування, істотно знижується вібраційна та статична міцність [68];

- переміщення у виробках, що виникають в процесі зварювальних операцій, є однією з причин утворення гарячих тріщин при зварюванні, так само в разі, якщо вони перевищили допустиме значення, можуть істотно ускладнити подальший процес складання або монтажу виробу, зробивши його неможливим в деяких випадках [71].

Таким чином, як зазначалося вище, загальні показники призначення і надійності зварного нафтогазового обладнання залежать від аналогічних показників зварних з'єднань, як найбільш слабких ділянок з точки зору наявності дефектів, концентраторів напруг, неоднорідності властивостей метала і т. д.

### **1.3 Методи зниження залишкових напруг і деформацій в зварних конструкціях**

#### **1.3.1 Загальні методи попередження і зниження залишкових напруг і деформацій в процесі складально-зварювальних операцій**

Застосовувані на практиці методи боротьби зі зварювальними залишковими деформаціями і напругами можна розділити на дві групи: методи запобігання (профілактики) виникнення деформацій і напруг в процесі зварювальних операцій і операцій термічного різання і методи їх зниження після зварювальних операцій.

До першої групи належать такі технологічні прийоми:

- істотне збільшення жорсткості зварюваної деталі за рахунок застосування спеціалізованої оснастки [23];

- збільшення пластичності матеріалу зварюваної деталі за рахунок попереднього нагріву перед зварюванням [22];

- визначення емпіричним шляхом оптимальної послідовності накладення зварних швів і послідовності приварювання деталей [71].

Збільшення жорсткості зварюваної деталі досягається застосуванням спеціалізованої оснастки типу розпирних пристосувань при зварюванні тонкостінних оболонкових конструкцій або закріпленням деталі до фундаменту і спеціального столу. Даний метод дозволяє суттєво знизити зварювальні деформації і викривлення конструкції, але при цьому значно збільшує рівень залишкових зварювальних напружень у деталі, що надалі при виготовленні відповідальних зварних конструкцій є причиною необхідності проведення термічних операцій.[23]

Попередній підігрів зварюваних крайок ґрунтується на явищі зниження міцності властивостей матеріалів з ростом температури. Так при нагріванні деталі до температури 200°C межа плинності низьколегованої сталі знижується в середньому на 20-25% [116] і релаксація залишкових напружень після зварювання відбувається більш інтенсивно, що позначається в зниженому рівні залишкових зварювальних напруг, що діють в деталі. Так само попередній підігрів, вирівнюючи поле температур по перерізу деталі, призводить до зниження рівня зварювальних деформацій конструкції [104].

Вибір оптимальної послідовності накладання зварних швів дає найбільші результати при зварюванні виробів складної форми, наприклад вузлів газотурбінних установок та авіаційних двигунів, однак широко застосовується і в менш точному машинобудуванні, яскравий приклад, зварювання поздовжніх швів двотаврових балок, де зварювальні шви накладаються хрест на хрест для зниження «грибоподові» в поперечному перерізі [71].

До другої групи методів, широко застосовуваних на практиці для зняття залишкових зварювальних напруг і деформацій, а так само підвищення експлуатаційних характеристик деталі після зварювання відносяться наступні технологічні прийоми:

- термічна обробка [22, 55];
- прокатка деформованих ділянок зварних деталей на спеціальних стендах [104];
- обкатка роликми або обдування дробом [71].

На сьогоднішній день найбільш поширеним методом зняття залишкових напруг і деформацій залишається термічна обробка, причому це характерно для всіх галузей промисловості, де в якості способу отримання з'єднання використовується дугове зварювання плавленням.

Циклограма режиму будь-якого з видів термічної обробки складається з наступних етапів: нагрівання до певної температури, витримування конструкції при даній температурі і подальшого охолодження [22].

Найпоширенішим видом термічної обробки є відпуск. Проведення даної операції направлено на отримання більш рівноважного структурного стану з метою зниження рівня зварювальних напруг і впливу на загартовані ділянки зварних з'єднань [55]. Залежно від температури нагріву розрізняють низький, середній і високий відпуск. При низькій відпусці температура нагріву не перевищує 250-300°C, що сприяє згладжуванню полів залишкових напруг і незначного підвищення пластичних властивостей металу. При проведенні середнього відпуску метал нагрівають до температури 300-400 °C з метою початку процесу розпаду мартенсита на більш рівноважні структурні складові, що сприяє зниженню твердості і міцності при одночасному збільшенні пластичних характеристик металу [55]. Високий відпуск проводять при температурах від 400 до 700 °C при подальшому повільному охолодженні. Мета високого відпуску - зниження рівня залишкових напруг і підвищення пластичності металу, хоча це і відбувається при зниженні міцності [104]. При всіх вищевказаних перевагах відпуску не забезпечує перекристалізації металу і відповідно не може усунути стовпчастої структури, ні явищ перегріву в околосшовної зоні.

В залежності від обсягу нагріваємого металу розрізняють загальний відпуск, коли вся деталь піддається нагріванню до певних температур, і локальний або місцевий відпуск, коли нагрівання піддається тільки частина деталі (зварне з'єднання), випробувала термічне або деформаційне вплив.

Іншим широко поширеним видом термічної обробки є нормалізація. Це процес передбачає нагрів вище третьої критичної точки, витримку при даній

температурі і охолодження на повітрі. Нормалізація проводиться з метою отримання однорідної структури і поліпшення механічних властивостей [55].

Термічна обробка нафтохімічної апаратури низкою нормативних документів, наприклад ГОСТ 52630-2006, передбачається, як обов'язкова операція. Проведення операцій термічної обробки апаратури для нафтохімії регламентується РТМ 24-66 «Термічна обробка нафто - хімічної апаратури і її елементів».

Загальновідомо, що термічна обробка є не тільки енергоємним і низько продуктивним процесом, але вимагає чіткого дотримання технологічних параметрів режиму обробки, що не завжди досягається у виробничих умовах, коли необхідно забезпечити однакову швидкість охолодження основного металу і металу зварного з'єднання [9]. Отже, зниження залишкових напружень і деформацій в оболонковій конструкціях, за рахунок проведення термічної обробки, є енергоємним і важкодоступним технологічним процесом.

Суть процесу прокатки полягає в стисненні оброблюваної деталі з двох сторін для завдання напрямку деформування металу з метою зниження відхилень деталі від проектної форми, а так само створення пластичних деформацій подовження для зниження рівня залишкових розтягуючих зварювальних напруг в зоні зварного з'єднання. Однак при проведенні даної операції необхідно враховувати обмежений запас пластичності матеріалу [109].

Обкатка роликми або обдування дробом застосовуються для створення на поверхневом шарі деталі, в результаті місцевої пластичної деформації наклепу і напруг стиснення, що дозволяє підвищити міцність і довговічність деталі при змінних навантаженнях[71].

Аналіз даних відкритого друку виявив ряд наступних альтернативних методів зниження зварювальних деформацій і напруг, а так само підвищення експлуатаційних властивостей зварних конструкцій:

- магніто-імпульсна обробка[10] і обробка вибухом [83-85];
- лазерна обробка зони зварних з'єднань [41, 92];



- вібраційна обробка [6, 21, 36, 38, 42, 58, 90, 91, 96, 98, 101, 107, 118-119, 129, 136-138];

- ультразвукова обробка [4, 89, 109, 113, 117].

Сутність способу обробки вибухом полягає у використанні енергії вибухової хвилі для зниження рівня залишкових напруг в зварних судинах і ємностях. Застосування даного способу дозволяє не тільки домагтися значного зниження рівня залишкових напруг, але і отримання в поверхневих шарах оброблюваної деталі стисклих залишкових напруг, сприятливо впливають на циклічну міцність і корозійну стійкість оброблюваної деталі [85]. Недоліком даного способу є необхідність застосування небезпечних вибухових речовин, обмеженість застосування тільки для деталей замкнутої форми найпростішої конструкції виключають ребра жорсткості і т. п.

Обробка лазером зони зварних з'єднань, по суті, являє специфічний вид термічно - ударної обробки, так встановлено, що при обробці лазером, внаслідок високої потужності і концентрації джерела випромінювання поблизу поверхні оброблюваної деталі виникає теплова ударна хвиля значної потужності [41]. Однак, недоліком способу є необхідність застосування дорогих лазерних установок, які до того ж мають обмеження щодо переміщення робочого органу – випромінювача, що природно стримує застосування даного методу в промисловості, особливо для обробки великогабаритних деталей.

З різних джерел видно, що накладення коливань на оброблювану деталь умовно поділяють на дві групи методів - вібраційну обробку, при якій частота накладувальних коливань не перевищує 1000 Гц – низькочастотну вібраційну обробку, і ультразвуковою обробку, при якій використовуються коливання вище 25000 Гц – ультразвукова обробка. З огляду на значну різницю в характері впливу низькочастотних і ультразвукових коливань на розплавлений і кристалізуючий метал, а так само істотну різницю в використовуваному обладнанні дані методи значно відрізняються.

Застосування ультразвукової обробки, незважаючи на всі її позитивні сторони, має ряд стримуючих факторів, а саме: значна ціна пристроїв, для збудження і регулювання параметрів високочастотних коливань, високий коефіцієнт затухання ультразвуку в металі. Таким чином, застосування ультразвукової обробки при виготовленні великогабаритних конструкцій складної форми представляється перспективним і економічним вигідним тільки в разі локального використання на невеликих обсягах.

Проведення низькочастотної вібраційної обробки вимагає менших матеріальних витрат, і внаслідок великих технологічних можливостей дозволяє отримати більш широкий спектр досягнутих ефектів, як у процесі зварювання так і після неї. По даному напрямку останнім часом наводиться значна кількість робіт, тому вони будуть розглянуті більш докладно нижче.

### **1.3.2 Методи зниження залишкових напруг застосуванням вібраційної обробки**

Технології застосування вібраційної обробки (віброобробки) із зазначених вище джерел, присвячених низькочастотної віброобробки, можна умовно розділити на дві групи: введення вібраційних коливань в розплавлений і відповідно закристалізований метал і обробка виробу після зварювання у твердому стані. З огляду на різний агрегатний стан оброблюваного металу, істотно відрізняється апаратура для проведення обробки, а також технологія процесу.

Установка для зняття залишкових напруг, що виникли в деталях в процесі зварювання і лиття, представлена на рисунку 1.1. Обробка проводиться на повністю кристалізованої деталі за рахунок накладення коливань частотою до 200 Гц [26].

У патенті 6223974 USA Trailing edge stress relief process (TESR) for welds / Madhavji A. – Publ. 01.05.2001 описується спосіб і пристрій для зняття напруг, що включає накладення циклічного навантаження на зварений шов в процесі зварювання [141]. Установка в процесі зварювання дозволяє вводити вібраційні

коливання в хвостову частину зварювальної ванни для впливу на розплавлений та закристалізований метал енергією коливань, що дає можливість отримання, як ефектів зниження залишкових напружень в зоні зварних з'єднань, так і підвищення якості зварних швів.

Враховуючи складність процесів, які протікають при вібраційній обробці, як затверділого, так і розплавленого металу, і їх прямий взаємозв'язок з параметрами коливань, а так само їх вирішальну роль в ефективності обробки, вплив останніх слід розглянути окремо і більш детально.

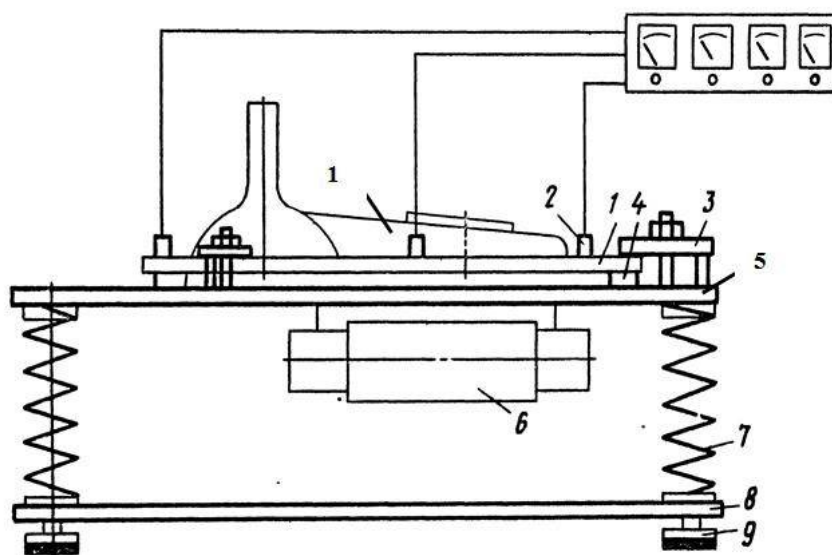


Рисунок 1.1 – Установка для зняття залишкових напруг [26]

1-оброблювана деталь; 2-датчики, що визначають рівень залишкових напруг;  
3-притиски; 4-прокладки; 5-верхня плита; 6-вібратор; 7-пружини; 8-нижня  
плита; 9-гумові підкладки (амортизатори)

### 1.3.3 Вплив виду і режимів вібраційної обробки на властивості оброблюваних деталей

Як було зазначено вище, методи вібраційної обробки діляться на два типи: для обробки розплавленого і кристалізуючого металу зварного шва і зварювальної ванни в процесі зварювання і для віброобробки затверділого металу зварного шва після зварювання.

Більшість наукових робіт з вібраційного впливу відносяться до обробки затверділого металу після зварювання. Якщо розглядати вібраційну обробку зварної конструкції, що проводиться після кристалізації зварного шва і його охолодження до температури навколишнього середовища, то основне призначення даного типу вібраційної обробки - це зниження залишкових напруг і деформацій. Дослідження по даному напрямку описані в різних літературних джерелах [34-35, 101, 105, 121, 132-134].

В роботі [101] вказують, що зниження залишкових напружень в процесі вібрації зварних конструкцій в затверділому стані досягається за рахунок поєднання напруг (вібраційних і залишкових), при певних величинах яких матеріал стає пластичним.

Якщо в тілі з певними залишковими напругами створити циклічно змінюються напруги, то процес зміни напруг для точки А на рисунку 1.2 може бути представлений в наступному вигляді. Початковий стан характеризується напругою  $\sigma_A$  і деформацією  $\epsilon_A$ . Першому циклу навантаження відповідає ділянка графіка ACDBD'. При цьому слід звернути увагу на те, що при знятті навантаження лінія CD паралельна лінії пружності на всьому протязі дії навантаження і трохи зменшується до кінця (DB) – ефект Баушингера [101].

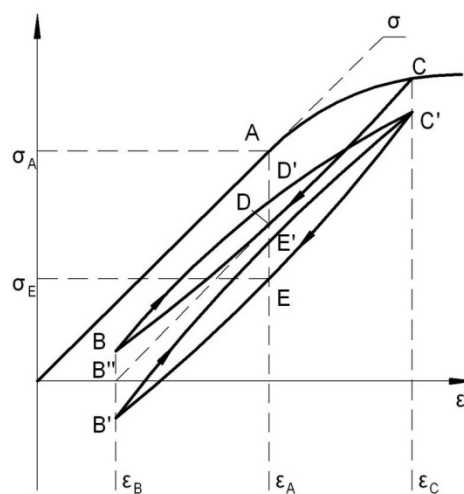


Рисунок 1.2 - Діаграма залежності рівня залишкових напруг ( $\sigma$ ) від величини деформації ( $\epsilon$ ) в процесі вібрації [101]

Наступні навантаження змушують метал приймати такі параметри, поки не утворюється стабільна петля гістерезису  $S'EB'E'S$ . Таким чином, якщо врахувати, що у вихідному стані величина залишкових напружень відповідає напруженням  $\sigma_A$ , то після вібрації вона вже відповідає значенню  $\sigma_E$ , а зниження напруги – різниці  $\sigma_A$  і  $\sigma_E$ . Кінцевий ефект вібрації є функцією величин змінних напруг і характеристик пружних властивостей матеріалу при циклічному навантаженні [101].

Необхідною умовою, при якому спостерігається зниження залишкових напруг, є досягнення межі плинності при вібрації поєднанням залишкових і вібраційних напруг. Величина межі текучості при циклічному навантаженні для деяких матеріалів може бути знижена в 2 рази в порівнянні з межею текучості при статичному навантаженні у зв'язку з чим при пульсуючих напругах невеликого рівня спостерігається зниження залишкових напружень [101].

Зниження залишкових напруг в металі зварного з'єднання є основним, але не єдиним результатом вібраційної обробки. В ході експериментів, описаних в [105] виявилось значна зміна мікротвердості. У зварному шві вона зростала, а в околешовної зоні – падала. Таким чином, вібраційна обробка затверділих зварних з'єднань не тільки знижує залишкові напруги в зварному з'єднанні, але і одночасно змінює механічні властивості металу зварного з'єднання [105].

У роботах [34-35] розглянуті нові обладнання та технології для низькочастотної віброобробки виробів в машинобудуванні, наведені конструкції нового обладнання та його технічні характеристики для реалізації процесу технології зняття напруг після операцій зварювання, лиття, механічної обробки та ін., а також обладнання для контролю напруг до і після обробки.

У роботі [121] розглянуто вплив низькочастотної вібраційної обробки на фазоструктурну нестабільність зварних з'єднань зі сталі 30ХГСА в порівнянні з операцією відпуску, також наведено результати металографічного і рентгеноструктурного дослідження різних зон зварних з'єднань.

Однак, при всіх вищевказаних позитивних ефектах даного методу обробки зварних з'єднань, він не отримав широкого промислового впровадження

внаслідок наступних причин. По-перше, залежність ефективності обробки від форми і розмірів деталі. Складність визначення результату обробки та ефективності вібраційного впливу. По-друге, метод не має можливості застосування для підвищення технологічної міцності зварного з'єднання, що особливо актуально при зварюванні сталей, схильних до утворення гарячих і холодних тріщин, і має незначний ефект усунення зварювальних деформацій.

Інший вид вібраційного впливу передбачає накладення коливань безпосередньо на зварювальну ванну для впливу на розплавлений і кристалізувальний метал. У зв'язку зі складністю і недостатнім вивченням процесу кристалізації в полі пружних хвиль, ефекти від впливу коливань на розплавлений і кристалізується метал в літературі розглядаються окремо один від одного.

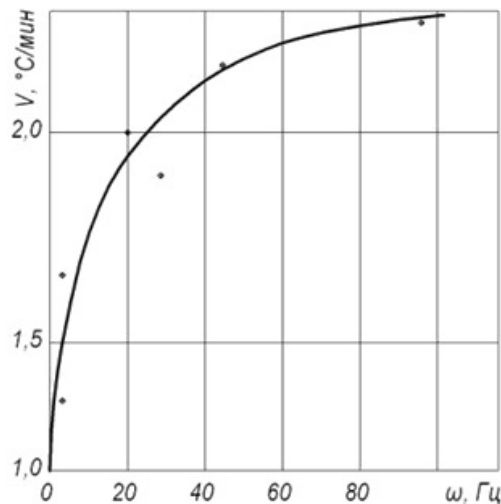


Рисунок 1.3 - Залежність швидкості охолодження розплаву від частоти пружних коливань (для злитка салолу та амплітуди 1мм) [41]

В роботах [41, 137, 138] доведено, що вібраційні впливи можуть викликати протікання в розплавленому металі наступних процесів:

- перемішування рідкої фази, за рахунок створення різниці тисків пружними хвилями, що збільшує теплопровідність в рідкій фазі і більш рівномірно розподіляє вхідні до складу розплавленого металу включення [137];

- висновок розчинених в рідині газових включень у процесі кавітації, що виникає з причини виникнення ультразвукових коливань від різних елементів конструкції, що знижує вірогідність утворення пір, знижує активність протікання корозійних процесів [138];

- підвищення тепловіддачі з навколишнім розплавленим металом твердої поверхні, що дещо збільшує швидкість охолодження (рисунок 1.3) [41, 42].

У вищезгаданих роботах встановлено, що для великих виливків ці умови забезпечуються при частоті вібрації 50..60 Гц з амплітудою 10 мм.

Однак для розплавлених обсягів меншого розміру, таких як зварювальна ванна, оптимальна частота для обробки в розплавленому стані за різними даними знаходиться в діапазоні від 50 до 300 Гц.[49, 118, 119, 129]. Численні дослідження формування кристалічних структур, показали, що застосування вібрації затвердуючих виливків і злитків супроводжується утворенням на кордоні затвердіння величезної кількості уламоків гілок дендритів і виникненням у розплаві багатьох центрів кристалізації. По суті, технологія вібраційної обробки сталі і сплавів це ніщо інше, як введення в розплав додаткової енергії пружних хвиль, яка дорівнює [40]:

$$dF_{виб} = 0,5 \omega^2 \cdot A^2 \cdot \rho \cdot dV, \quad (1.2)$$

де  $\rho = dm / dV$  - щільність середовища,  $m$  - маса частинки в обсязі  $dV$ ;

$\omega$  и  $A$  - частота і амплітуда пружних хвиль відповідно.

З наведеної залежності випливає, що збільшення вібраційної енергії сприяють збільшення частоти і амплітуди вібрації, а також щільності середовища.

Величина вільної енергії системи, що піддається вібрації, складе [40]:

$$\Delta F = F + F_{виб} - S(T_1 - T_2) - \sigma \cdot \alpha_\sigma, \quad (1.3)$$

де  $\Delta F$  - вільна енергія системи;

F - внутрішня енергія системи;

S - ентропія системи;

T1 , T2 - температури рідкого і твердого станів системи;  $\sigma$ -поверхнева енергія на границі фаз «кристал - рідина»;

$\alpha_\sigma$  - сумарна площа поверхонь всіх кристалів (гілок, дендритів, тощо).

З формули (1.3) видно, що зі збільшенням потужності вводиміх пружних коливань відбувається збільшення вільної енергії. Значення вібраційної енергії при формуванні кристалічних структур полягає в тому, що вона витрачається на обламування гілок, дендритів і створення в системі додаткових центрів кристалізації. Виділення при цьому обсягів переохолодженого металу навколо кожного з них та подальше їх зростання відбувається за рахунок внутрішньої енергії системи. При цьому низькочастотна вібрація, що застосовується на практиці характеризується частотою до 200 Гц і амплітудою від 0,5 до 3 мм [137].

У роботах [40, 136-138] вказується, що вібрації можуть призводити до здрібнення зерна з двох причин. Перша – це формування вібраційних потоків рідини, що в свою чергу викликає змивання кристалічних зародків від фронту кристалізації і розкид їх по всьому об'єму. У цьому випадку майже одночасно кристалізується весь обсяг, що містить безліч затравочних кристалів з одночасним вирівнюванням температури в об'єме рідини [40]. Друга - кавітаційне руйнування кристалічного фронту при великих енергіях коливань. Кавітація відбувається на газових бульбашках, які виділяються на кристалічному фронті внаслідок того, що розчинність в твердій фазі нижче, ніж в рідкій. Відкинуті кавітацією в розплав центри кристалізації стають затравками для формування дрібнозернистої структури. Однак при цьому виходить пухка кристалічна структура, т. к. газові порожнини замуrowані твердою фазою, формующоюся на затравках поблизу кристалічного фронту. Таким чином, при малих енергіях коливань вирішальним виявляється перемішування розплаву і вирівнювання температур [136-138].



Експериментальне підтвердження вищезазначених фактів і гіпотез показано в роботі [40], де авторами на натурному зразку з камфену (легкоплавкої речовини, кристалізуючогося аналогічно з металами) розміром 240\*115\*5 мм проведено моделювання впливу вібраційної обробки на темп кристалізації і характер мікроструктури одержуваного злитка. На расплавленій камфен здійснювалося вплив вібраційними коливаннями частотою 65 Гц з амплітудою 1мм. Експеримент дозволив спостерігати просування кордону затвердіння. На поверхні кордону було видно колонки зростаючих кристалів, які під дією пружних хвиль безперервно руйнувалися. Одночасно на цей кордон надходило безліч найдрібніших індивідуальних кристаликів з верхнього горизонту злитка. Цей горизонт знаходився на певній відстані від фронту кристалізації (нижче відкритого рівня) і переміщався вгору у міру затвердіння. Опускаються кристалики залишали за собою гідродинамічний слід, який вказував на їх кавітаційне походження[40].

В процесі накладення вібраційних коливань на відкритій поверхні розплаву утворювалася горизонтальна синусоїдальна хвиля, імпульси прискорення і швидкості якій поперемінно спрямовані вертикально вниз або вгору. Автори припускають, що виникають при застосовуваних параметрах вібрації імпульси створювали умови для виникнення кавітаційних каверн, які зачиняючись, викликали тиск достатній для утворення дрібних кристалів. Аналіз результатів показав, що структура злитка піддається вібраційної обробці дисперсних глобулярних кристалів, рівномірно розташованих по всьому перетину злитка, а затверділого без включення коливань складалася з грубих кристалів [40].

Дане дослідження показує, що при вібраційній обробці затвердіваючих сплавів з певною інтенсивністю виникають два таких джерела формування кристалічної структури: обламування і подрібнення кристалів, що ростуть на фронті кристалізації і дрібні кристали, які надходять із зони кавітації сплаву.

Таким чином, автори встановили, що вібрація, не порушуючи температурного поля затверділого злитка, забезпечує формування дисперсної

кристалічної структури і скорочує тривалість твердіння, що знижує можливість утворення в злитку грубих ливарних дефектів.

У роботі [136] на моделі вивчені особливості затвердіння непривабливої литої заготовки в залежності від способу підведення до неї віброімпульсу. Встановлено, що ефективність вібраційної обробки безперервно литих заготовок залежить від місця застосування, параметрів і напрямку віброімпульсу.

У роботі вказується, що на ефективність обробки істотний вплив робить не тільки місце підведення коливань, але і такі параметри вібрації, як амплітуда і частота. Істотний вплив вібрації, незалежно від місця підведення і напрямку імпульсу, починається з 60 Гц і практично закінчується при 80 Гц. Збільшення амплітуди вібрації посилює її вплив при тій же частоті [42].

Вплив вібраційної обробки на структуру і властивості злитка стали 60 розглянуто в роботі [40]. При проведенні експерименту в виливницю у вигляді усіченого конуса заливали сталь 60. Виливниці одночасно з розплавом повідомлялася вібрація частотою 100 Гц і амплітудою 2,5 мм. Авторами проаналізовано зміна механічних властивостей металу на тлі різних характеристик мікроструктури, одержуваних на зразках з вібраційною обробкою і без. На основі випробувань на статичне розтягнення стандартних образців показники міцності зростали до 8%, а пластичні властивості до 25-50%.

У роботах [49, 129] розглянуто вплив вібраційних коливань на властивості зварних з'єднань, одержуваних ручним дуговим зварюванням і зварюванням в середовищі захисних газів. Встановлено, що накладення вібраційних коливань у процесі зварювання дозволяє підвищити механічні властивості і корозійну стійкість металу зварних з'єднань, а так само знизити рівень жолоблення конструкції. Однак результати робіт не можуть бути застосовані при автоматичних способах зварювання, зокрема великогабаритних конструкцій, одержуваних зварюванням під шаром флюсу.

Таким чином, метод супутньої вібраційної обробки з'єднань має перспективи застосування і в процесі зварювання, т.к. вібраційний вплив

сприймає не тільки затверділий метал зварного з'єднання, але і розплавлений і закристалізований метал зварювальної ванни, що дозволяє отримати більш широкий спектр позитивних ефектів від обробки, а також дає можливість застосування локального введення пружних коливань безпосередньо в зону зварювання.

В роботі [130] показано, що вібраційна обробка в процесі зварювання ефективно знижує овальність із збільшенням амплітуди віброшвидкості незалежно від конструкції зварюваних заготовок. При збільшенні значення віброшвидкості більше 30 см/с подальшого значущого ефекту не спостерігається. З урахуванням результатів механічних випробувань, які показали, що для зниження механічних властивостей зварного шва амплітуда віброперемещень при зварюванні не повинна перевищувати 0,8 ... 1 мм [118-119, 129] можна зробити висновок про ефективну частоту вібраційної обробки, яка становить – 47,8...59,75 Гц. При цьому вирішальним параметром є виключно амплітуда вібрації (вібропереміщення).

У роботі [129] розглядається можливість застосування вібраційної обробки для поліпшення механічних та інших властивостей зварних з'єднань. Проведено аналіз робіт в даній області за впливом коливань різного роду і їх характеристик на розплавлений, кристалізується і затверділий метал. Представлені результати дослідів, проведених авторами, за визначенням впливу вібраційних коливань на розплавлений і кристалізований метал зварного з'єднання сталей різних класів і марок. Салмінім А.Н. висловлена гіпотеза про ефективність застосування вібраційної роботи в полічастотних режимах.

Хафизова О. Ф. у своїй роботі [131] показала на прикладі зварювання елементів трубопроводу з різнорідних сталей 16ГС і стали 20 можливість застосування вібраційної обробки в процесі зварювального циклу для поліпшення механічних властивостей сполук і зниження негативного впливу відмінності фізико-механічних характеристик зварюваних сталей. Привела методику проведення експериментальних досліджень з описом обраних режимів зварювання і супутньої обробки.

Проведена патентна опрацювання показала, що є зареєстровані винаходи в цій галузі, як у Росії, так і за кордоном [80-83, 142-146].

#### **1.4 Висновки по главі**

1. Виникаючі в процесі зварювання корпусів апаратів залишкові напруга і деформації конструкції значно знижують точність виготовлення конструкції, а також впливають на надійність, якість роботи і трудоємкість виготовлення апарату, знижують технічні характеристики обладнання, що негативно впливають на технологічний процес.

2. Недостатня точність при виготовленні зварних деталей корпусів апаратів призводить до призначення великих припусків під механічну обробку або значного обсягу прігоночно - доробочних робіт. У ряді випадків це призводить до невисокої якості збірки, створення зони з підвищеними внутрішніми напругами в області шва і негативно впливає на працездатність конструкцій.

3. Термічна обробка при виготовленні зварних оболонкових контрукцій практично не дозволяє впоратися з виникаючими залишковими деформаціями і застосовується, як правило, тільки для зняття залишкових напруг при виготовленні апаратів.

4. Одним з розроблюваних в останні роки способом зниження напруг і деформацій є вібраційна обробка зварних з'єднань, як в процесі зварювання, так і після неї. Однак, на сьогоднішній день даний вид обробки в умовах виробництва зварного обладнання не має широкого поширення через цілого комплексу недосліджених і невирішених проблем: досяжна точність для великогабаритних деталей і прогнозування цієї точності; фіксація і реєстрація результатів обробки, відсутність необхідного обладнання і методики вибору оптимальних параметрів процесу вібраційної обробки, вплив різних типів обробки на властивості металів, необхідність атестації технології зварювання із застосуванням віброобробки.

4. Аналіз даних відкритого друку і проведена патентна опрацювання показала наявність достатньої кількості робіт в даній області. Серед прочого були висловлені гіпотези про підвищення ефективності вібраційної роботи за рахунок полічастотної обробки, проте досліджень в даній сфері не проводилося.

Враховуючи необхідність сьогоденного вітчизняного виробництва в економії металу і енергоресурсів, створення більш чистих екологічних процесів, підвищення продуктивності і точності виготовлення зварних корпусів апаратів метою цієї роботи є підвищення точності виготовлення корпусів зварювальних апаратів схильних до значних деформацій у значних деформацій внаслідок вварки патрубків.

До таких апаратів можна віднести корпус вертикального фільтра виготовленого зі сталі 09Г2С, технологія виготовлення якого на сьогоднішній день досить скрутна і має ряд недоліків.

Поставлена мета може бути досягнута проведенням комплексу теоретичних і експериментальних досліджень і розробок. Нижче викладено основні задачі досліджень.

#### **Задачі досліджень:**

- аналіз і узагальнення світового досвіду в галузі дослідження зміни овальності зварних корпусів апаратів у процесі їх виготовлення з низьковуглецевих і низьколегованих сталей;

- обґрунтування вибору відомих розрахункових і експериментальних методів досліджень, що дозволяють детально вивчити вплив режимів вібраційної обробки на властивості зварних з'єднань;

- аналіз результатів проведених досліджень впливу вібраційної обробки на рівень накопичення зварювальних напруг і деформацій, мікроструктуру і механічні властивості зварних з'єднань;

- розробка технологічного процесу вібраційної обробки зварних з'єднань для підвищення точності виготовлення корпусів апаратів за формою поперечного перерізу.

## 2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗВАРНИХ КОРПУСІВ АППАРАТОВ СХИЛЬНИХ ДО ЗНАЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ВНАСЛІДОК ВПЛИВУ ЗВАРЮВАЛЬНИХ НАПРУГ

### 2.1 Загальні закономірності утворення напруг і деформацій в про- лочкових конструкціях в процесі зварювальних операцій

У циліндричних корпусах апаратів найбільш часто застосовують кругові шви, для яких, особливо при їх малому діаметрі, характерно утворення значних деформацій і напруг в радіальному напрямку внаслідок характеристик жорсткості такого перетину [9]. В процесі роботи оболонкового обладнання поєднання цих напруг з напругами від зовнішніх навантажень, а так само наявності гетерогенності властивостей металу по ширині зварного з'єднання і агресивного середовища, як зовнішньої так і внутрішньої, може стати причиною уповільненого руйнування по зоні зварного сполучення і довколишнього основного металу, що відчуває концентрацію напруг [23, 121].

Закономірності виникнення і розподілу залишкових зварювальних напружень у поздовжніх швах циліндричних обичайок при зварюванні з технологічної точки зору принципово не відрізняються від стикового зварювання листів [71].

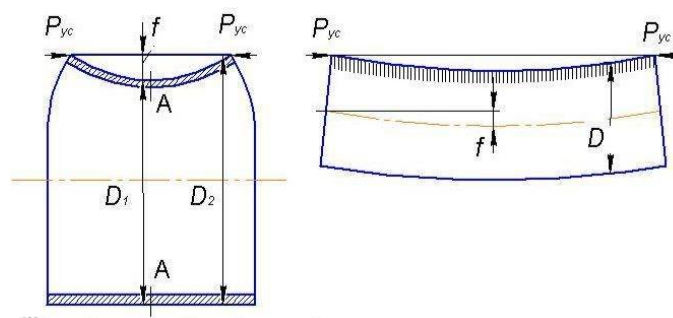


Рисунок 2.1– Деформації циліндричних обичайок від поздовжніх зварних швів [71]: а) – «короткі» обичайки; б) – «довгі обичайки»

Після зварювання обичайок між собою накладення кільцевого шва внаслідок дії окружної усадочної сили утворюється місцевий вигин і зменшення діаметра в зоні кільцевого шва [71].

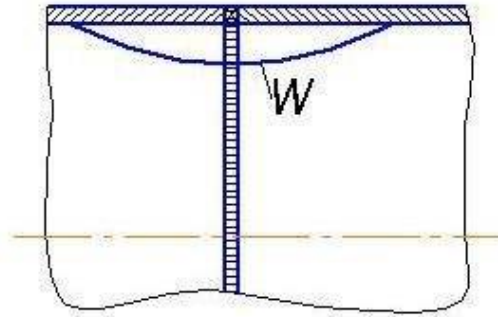


Рисунок 2.2 – Переміщення ( $w$ ) в зоні кільцевого шва циліндричної оболонки [71]

Розглядаючи зварювальні деформації виникають в корпусі апарата після приварювання штуцерів, можна побачити локальні деформації в зоні сварного шва спрямовані вглиб обичайки, у разі якщо діаметр вварюваного патрубка незначний по відношенню до корпусу апарату. У разі, якщо діаметр вварюваного патрубка має значні розміри по відношенню до корпусу можливі деформації, показані на рисунку 2.3.

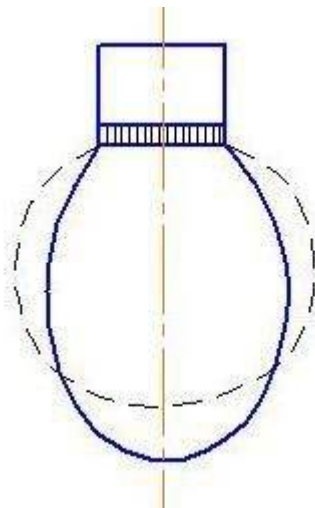


Рисунок 2.3 – Деформації циліндричних обичайок від кругових зварних швів

При дослідженні формування похибок форми і розмірів корпусов апаратів після проведення комплексу дослідно-промислових досліджень технологічного процесу виготовлення замерного сепаратора в роботі [130] показано, що найбільша овальність в корпусі виникає після приварювання штуцерів і



внутрішніх пристроїв.

Також, на значний рівень напруг і деформацій у вузлі після приварювання штуцера вказується в роботі [49], в якій проведена оцінка напружено-деформованого стану вузла приварювання штуцера.

У зв'язку з цим виникає необхідність розглянути технологічний процес виготовлення зварного корпусу апарату має штуцерні вузли, займають значну поверхню корпусу.

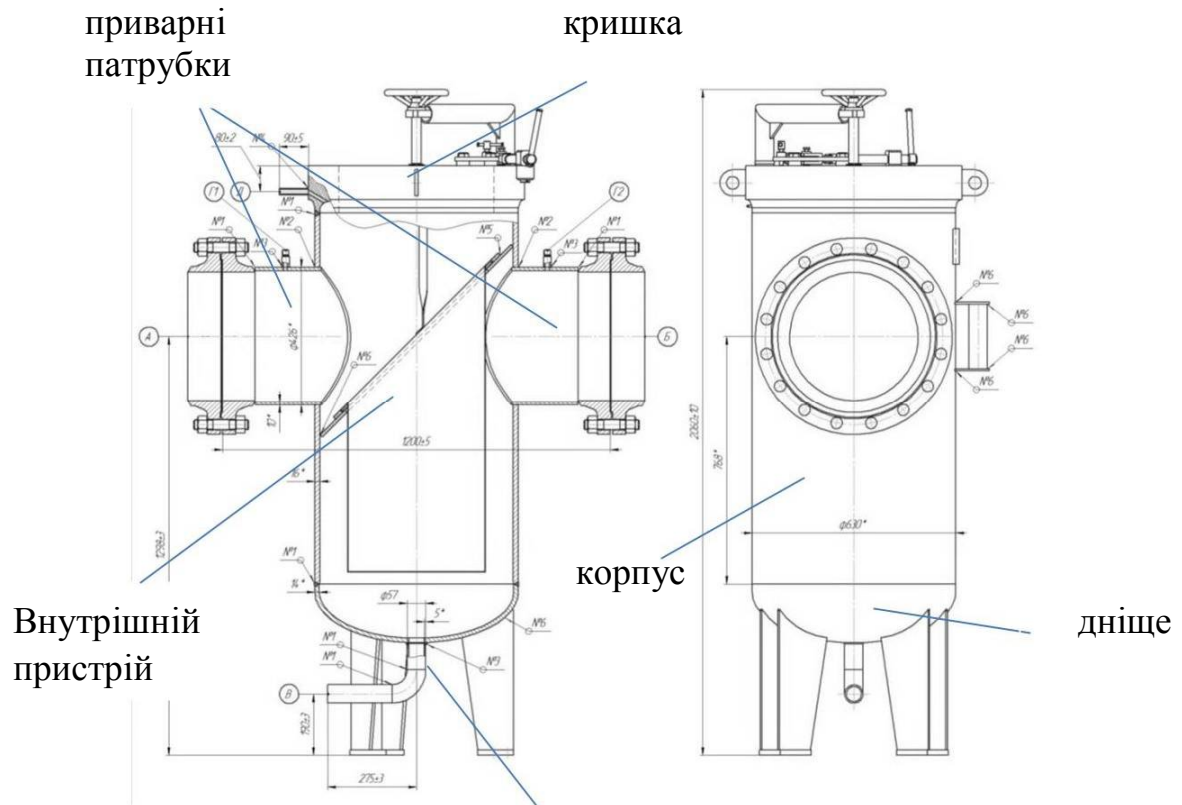
## **2.2 Аналіз технологічного процесу виготовлення зварного корпусу фільтра вертикального і дослідження формування похибок форми і розмірів корпусу**

У даній роботі був проведений аналіз технології виготовлення зварного корпусу фільтра вертикального із зовнішнім діаметром 630 мм, товщиною стінки 16 мм, виконаного зі сталі 09Г2С (рисунок 2.4). Також був проведений комплекс дослідно - промислових досліджень впливу різних операцій виконуваних в процесі виготовлення корпусу фільтра на його відносну овальність, за прикладом наведеному в роботі [130].

Для нафтохімічної апаратури в основному застосовуються корпусу, зібранні з обичайок, виготовлених вальцюванням на листозгинальних машинах. В окремих випадках для виготовлення корпусів використовуються труби зварні відповідно ГОСТ 20295-85.

На рисунку 2.4 показана конструкція фільтра, основними базовими елементами якого є: корпус діаметром 630 мм і товщиною 16 мм (обичайка виконана гнучкою з наступним зварюванням поздовжнього шва), сварні патрубки діаметром 426 мм з товщиною стінки 10 мм, днище з товщиною стінки 14 мм, кришка і внутрішній устрій. При виготовленні фільтра виникають проблеми при складанні циліндричного корпусу з кришкою, днищем і внутрішніми пристроями із-за наявності великої овальності в перерізі корпусу, яка перевищує допустиму величину, рівну згідно ГОСТ Р 52630-2006 - 1% для посудин і апаратів, що працюють під внутрішнім тиском. Крім цього нерідко в

поєднанні кришки і корпусу спостерігаються поздовжні холодні тріщини в зварному шві і зоні термічного впливу, що виникають із-за значних зварювальних напруг і деформацій, обумовлених конструктивними особливостями і технологією виготовлення фільтра (рисунок 2.5)

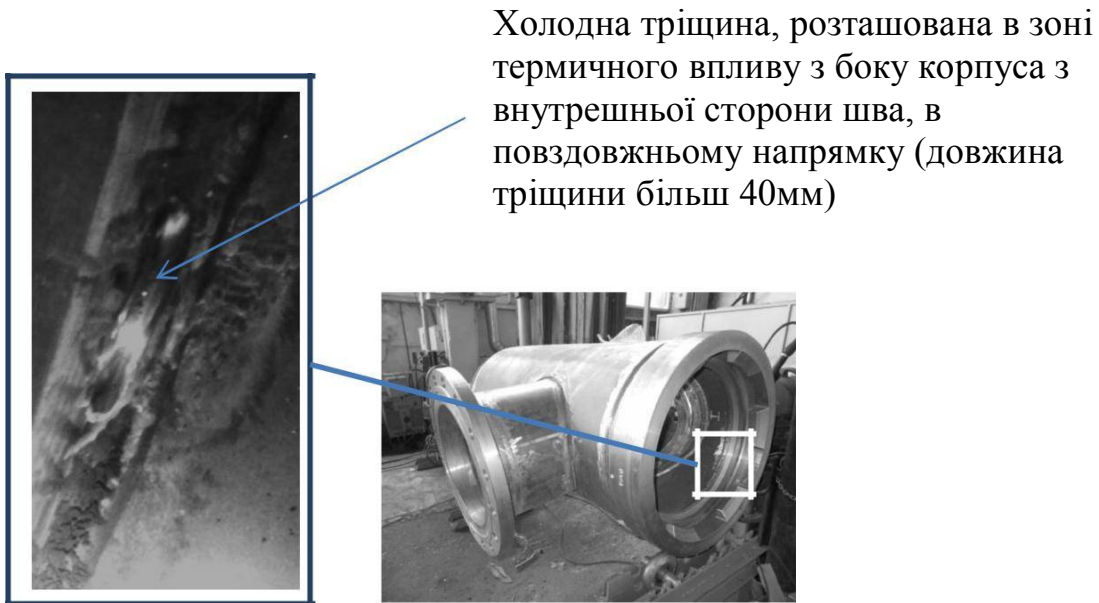


а) загальний вигляд



б) фото фільтра

Рисунок 2.4 - Конструкція фільтра



Холодна тріщина, розташована в зоні термічного впливу з боку корпусу з внутрішньої сторони шва, в повздовжньому напрямку (довжина тріщини більш 40мм)

Рисунок 2.5 – Холодна тріщина в ЗТВ зварного з'єднання корпусу і кришки фільтра

З метою виявлення причин виникнення відносної овальності в стиковому перерізі корпусу нами були проведені виміри  $D_{min}$  і  $D_{max}$  – максимальний і мінімальний зовнішні діаметри, за якими визначається значення відносної овальності  $a$ , що розраховується згідно ГОСТ Р 52630-2006 за формулою:

$$a = \frac{2(D_{max} - D_{min})}{D_{max} + D_{min}} * 100\%, \quad (2.1)$$

де  $D_{max}$  і  $D_{min}$  - відповідно максимальний і мінімальний зовнішні діаметри корпусу.

Зважаючи на те, що формування стикувальних розмірів обичайок носить спадковий характер і залежить від технологічного процесу виготовлення і збірки корпусу, а саме: виготовлення обичайки; вирізки отворів під штуцера; збірки і попередньої приварки штуцерів; приварки внутрішнього устрою, приварки кришки і днища, обварки штуцерів, то і заміри зовнішніх діаметрів

$D_{max}$  і  $D_{min}$  обичайок проводили поетапно (значення заміряних величин після кожної операції наведені в таблицях 2.1-2.6).

Заміри діаметрів виробляли з боку в якій спостерігаються найбільші відхилення, що знаходиться поблизу встановлюваних штуцерів, відстань від краю обичайки до поверхні штуцера близько 160 мм. Фотографії фільтра на різних етапах виготовлення представлені на малюнку 2.6 дослідженню піддалися 4 корпуси фільтра. Для вимірів використовували металичну рулетку, точність вимірювання  $\pm 0,5$  мм.

Таблиця 2.1 – Овальність обичайок після виготовлення обичайок (гнуття, зварювання, калібрування)

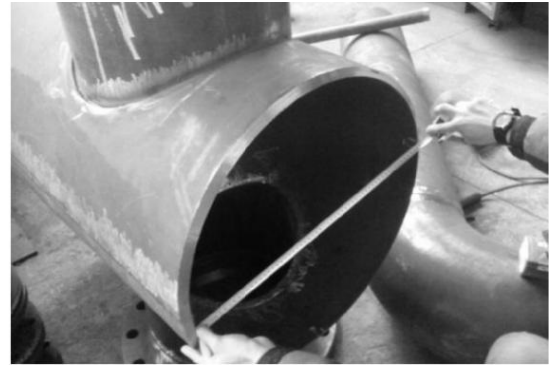
№ пп	Максимальний діаметр, $D_{max}$ , мм	Мінімальний діаметр, $D_{min}$ , мм	Відносна овальність, а, %
1	630	629	0,16
2	633	630	0,48
3	632	629	0,48
4	631	630	0,16
Середнє значення			0,32

Таблиця 2.2 - Овальність обичайок після вирізки отвору

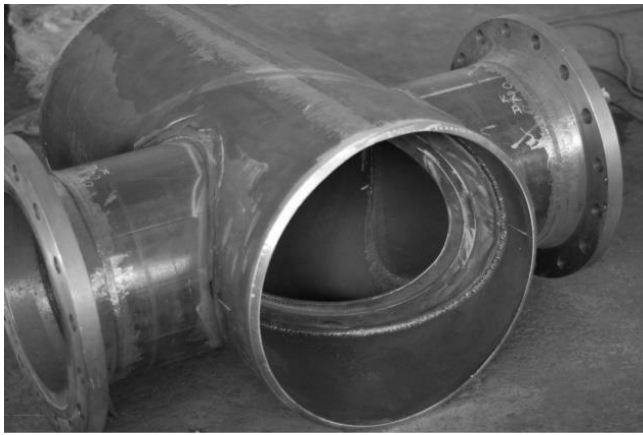
№ пп	Максимальний діаметр, $D_{max}$ , мм	Мінімальний діаметр, $D_{min}$ , мм	Відносна овальність, а, %
1	633	627	0,95
2	634	629	0,79
3	634	627	1,11
4	633	628	0,79
Середнє значення			0,91



а) корпусу фільтрів після прихватки  
штуцерів і обичайки після  
калібрування (на задньому плані)



б) замір діаметрів після попередньої  
приварювання штуцерів



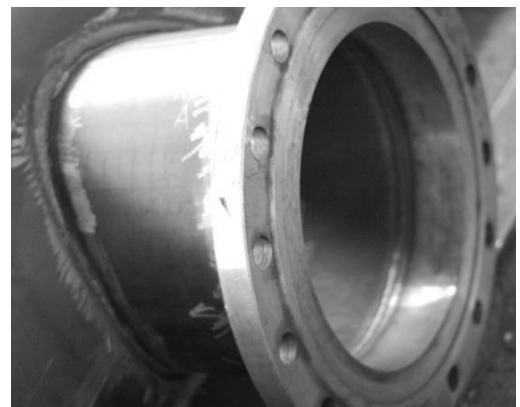
в) корпус після приварювання  
внутрішньо-го пристрою



г) корпус перед прихваткою кришки  
(зменшення овальності за допомогою  
домкрата)



д) корпус після приварювання фланця  
кришки і днища



е) в процесі остаточної обварки  
штуцерів

Рисунок 2.6 - Фотографії фільтра на різних етапах виготовлення

Як правило, максимальний і мінімальний діаметр в різних обичайок щодо поздовжнього стику не збігається. Відносна овальність збільшується, при цьому максимальний і мінімальний діаметри зосереджуються, як правило, щодо вирізаних отворів під приварювання штуцерів. Через втрату жорсткості відбувається розвантаження корпусу, розташування максимального і мінімального діаметрів незначно змінюються.

Таблиця 2.3 - Овальність обичайок після складання і часткового приварювання штуцерів

№ пп	Максимальний діаметр, Dmax, мм	Мінімальний діаметр, Dmin, мм	Відносна овальність, а, %
1	640	624	2,53
2	638	623	2,38
3	637	622	2,38
4	636	623	2,07
Середнє значення			2,34

Після складання, прихватки і часткової обварки штуцерів (зварювання корневого шва) відбувається значна зміна діаметрів, причому розташування максимального діаметра у всіх випадках мало один напрямок з віссю штуцерів. Мінімальний діаметр відповідно розташовувався практично перпендикулярно осі приварених патрубків.

Перед приварюванням внутрішнього пристрою проводиться невелика корекція овальності корпусу із застосуванням струбцин, домкрата та інших способів, з метою зменшення овальності і зниження тиск корпусу на внутрішні посадочні поверхні. Розташування максимального і мінімального діаметрів зберігається.

Після приварювання внутрішніх пристроїв, корпус має значну овальність (перевищує нормативні значення). Розташування максимального діаметра уздовж осі штуцерів, мінімальний діаметр відповідно розташовується перпендикулярно. Перед приварюванням кришки і днища також проводиться

корекція овальності корпусу з застосуванням домкрата, з метою зменшення овальності і зниження відхилення зварюваних кромок (рисунок 2.6, г).

Таблиця 2.4 - Овальність обичайок після приварювання внутрішнього устрою

№ пп	Максимальний діаметр, D <sub>max</sub> , мм	Мінімальний діаметр, D <sub>min</sub> , мм	Відносна овальність, а, %
1	640	625	2,37
2	638	625	2,06
3	637	622	2,54
4	637	623	2,22
Середнє значення			2,30

Таблиця 2.5 - Овальність обичайок після приварювання кришки і днища

№ пп	Максимальний діаметр, D <sub>max</sub> , мм	Мінімальний діаметр, D <sub>min</sub> , мм	Відносна овальність, а, %
1	632	630	0,32
2	632	629	0,48
3	633	630	0,48
4	631	628	0,48
Середнє значення			0,44

З урахуванням проведених заходів, описаних вище, овальність корпусу значно знижується. Фланець кришки значно збільшує жорсткість корпусу. Розташування максимального і мінімального діаметрів зберігається, але значення їх знижується.

Після остаточної обварки штуцерів (наплавлення наповнювальних та облицювальних шарів) овальність корпусу поблизу зварних з'єднань з днищем і фланцем кришки незначно зростає. Значне стримування овальності відбувається через високу жорсткості кришки і днища. В такому випадку

зниження деформацій викликає зростання значних напруг в області зварного з'єднання.

Таблиця 2.6 - Овальність обичайок після остаточної обварки штуцерів

№ пп	Максимальний діаметр, Dmax, мм	Мінімальний діаметр, Dmin, мм	Относительная овальность, а, %
1	632	629	0,48
2	633	629	0,63
3	633	630	0,48
4	631	628	0,48
Среднее значение			0,52

Відсутність у відповідність з регламентом на виготовлення проведення операцій термічної обробки (відпуску) з урахуванням наявності високого рівня напруг від деформацій корпусу, а також зварювальних напруг в поєднанні корпусу і кришки підвищує ймовірність руйнування конструкції в даному вузлі. Так на одному з чотирьох виготовляються фільтрах з'єднання кришки і корпусу з внутрішньої сторони шва в зоні термічного впливу з боку корпусу, в поздовжньому напрямку була виявлена холодна тріщина довжиною більше 40 мм з розкриттям менше 1 мм (рисунок 2.5).

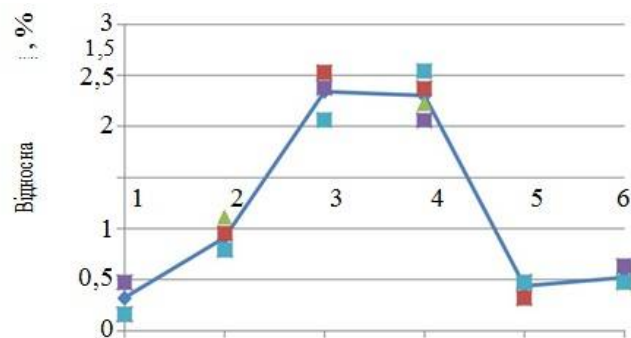


Рисунок 2.7 - Зміна відносної овальності корпусу на різних стадій виготовлення фільтра



1 - виготовлення обичайки; 2 - вирізка отворів під штуцера; 3 - збірка і частічна приварка штуцерів; 4 - приварка внутрішнього устрою, 5 - приварка кришки і днища; 6 - остаточна обварка штуцерів

На рисунку 2.7 показано зміну відносної овальності корпусу на кожній стадії технологічного процесу виготовлення.

На рисунку 2.8 показано зміну відносної овальності корпусу на торцях, на кожній стадії технологічного процесу виготовлення. Відстань від поверхні приварюваного штуцера до торця з'єднання з кришкою становить 170 мм (переріз А-А), а до торця з'єднання з днищем - 540 мм (сечення Б-Б).

Аналіз процесу виготовлення корпусу показує яскраво виражену спадковість накопичення овальності. Перед приварюванням внутрішнього устрою виробляється невелика корекція овальності корпусу з застосуванням струбцин, домкрата і інших пристосувань, проте після приварки внутрішніх пристроїв корпус в перерізі А-А має значну овальність 2,06...2,54%.

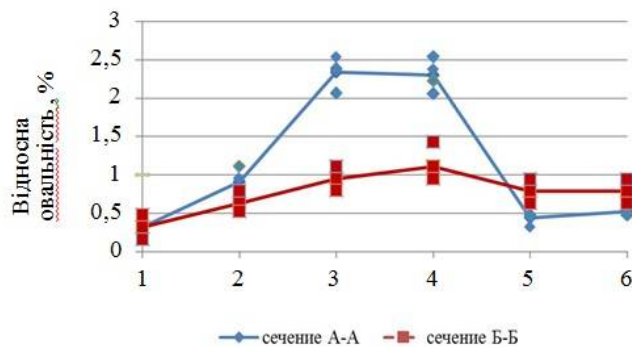


Рисунок 2.8 - Зміна відносної овальності в двох перетинах корпусу на різних стадіях виготовлення фільтра

1 - виготовлення обичайки; 2 - вирізка отворів під штуцера; 3 - збірка і частічна приварка штуцерів; 4 - приварка внутрішнього устрою, 5 - приварка кришки і днища; 6 - остаточна обварка штуцерів

В процесі дослідження, для оцінки зміни овальності по утворюючий корпусу апарату були також проведені виміри діаметрів уздовж корпусу після

складання і часткової обварки штуцерів (рисунок 2.9). Забір діаметрів і розрахунок відносної овальності в місці установки штуцерів не виробляли.



Рисунок 2.9. - Фото проведених вимірів діаметрів

Результати розрахунку відносної овальності вздовж корпусу апарату після складання і часткової обварки штуцерів представлені на рисунку 2.10.

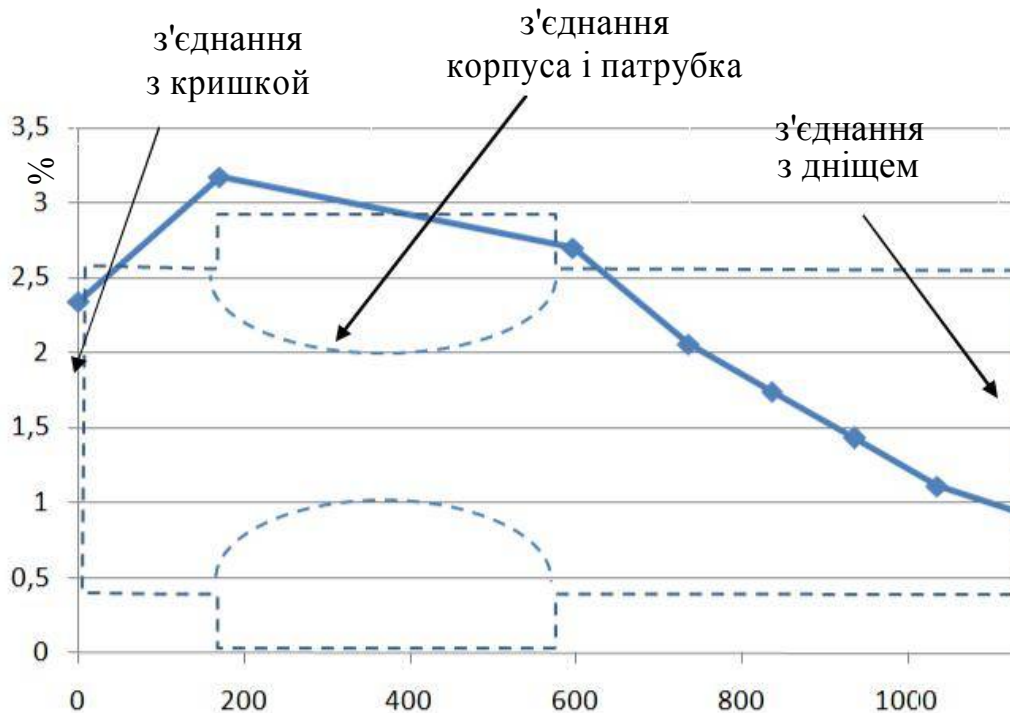


Рисунок 2.10 - Зміна відносної овальності уздовж корпусу апарату після складання і часткового обварювання штуцерів

Результати досліджень показали, що зміна овальності має частково спадковий характер. Розташування максимальних і мінімальних діаметрів корпусу в процесі виготовлення змінюється.

Найбільше збільшення овальності спостерігається після прихватки і накладення кореневого шва на етапі приварки штуцерів . Подальші операції виготовлення корпусу пов'язані з корекцією овальності і застосуванням спеціальних пристосувань і пристроїв (струбцини, домкрати і т. д.).

На заключних етапах збільшення овальності корпусу стримується за рахунок жорсткості приварних елементів. При цьому йде значне зростання внутрішніх напруг в конструкції, який підвищує ймовірність утворення холодних тріщин.

Для зниження внутрішніх напруг, з метою зменшення овальності і ймовірності утворення тріщин рекомендується проводити термічний відпуск конструкції, або використовувати альтернативні технології вібраційної або ультразвукової обробки [105, 130].

### **2.3 Дослідження зміни овальності в процесі виготовлення свар-них корпусів апаратів схильних до значних деформацій внаслідок впливу зварювальних напруг**

Як вказувалося вище, приварювання штуцерів надає значний вплив на овальність виготовляемого корпусу, особливо якщо дані штуцера вварені поблизу краю обичайки. Для оцінки впливу параметра штуцера на зміну овальності апарату після його приварювання були проведені виміри овальності різного корпусного обладнання до і після приварювання штуцера. Заміри проводилися в умовах виробництва на реальних апаратах. Для вимірів приймали апарати, штуцери яких знаходилися в безпосередній близькості до торця обичайки (не більше 200 мм від поверхні штуцера). Матеріальне виконання корпусів - сталь марки 09Г2С, спосіб зварювання ручна дугова покритими електродами або напівавтоматична в середовищі захисних газів.

На рисунку 2.11 представлені фото і опис досліджуваних корпусів апаратів.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.11 – Фото досліджуваних корпусів

а) ємність типу ЕПП-8-2000 сталь 09Г2С, внутрішній діаметр корпусу 2000 мм, товщина стінки 8 мм: вварка штуцера – труба безшовна гарячедеформована  $\varnothing 203 \times 8$  мм; варіння люка - внутрішній діаметр 700 мм, товщина стінки 8мм; б) фільтр рідинний, сталь 09Г2С, корпус – вварна обичайка  $\varnothing 630 \times 16$ : врізання штуцера - труба безшовна гарячедеформи-ванна  $\varnothing 426 \times 10$ мм) фільтр рідинний типу СДЖ, сталь 09Г2С, корпус діаметр 530мм, товщина 10 мм: врізка штуцера - труба безшовна гарячедеформована  $\varnothing 273 \times 7$  мм; г) фільтр гідроциклонний, сталь 09Г2С, корпус – зварна обичайка  $\varnothing 630 \times 16$ : врізання штуцера - труба безшовна гарячедеформи-роvanная  $\varnothing 159 \times 8$  мм.

Зі збільшенням товщини металу підвищується жорсткість корпусу апарата зростає опір деформаціям, однак, при цьому також підвищується і обсяг наплавленого металу, який збільшує усадочні сили і сприяє зростанню деформацій. При дослідженні, в порядку допущення ці два взаємо компенсуючих фактора не враховували.

Крім цього, на рівень і характер розподілу залишкових зварювальних напружень і деформацій впливає безліч факторів, таких як режими зварювання, тип основного металу і матеріал електрода, геометричні параметри деталей, зварного шва і т. д.

З практичних спостережень відомо, що найбільші відхилення пов'язані зі збільшенням діаметра вварюваного штуцера (патрубка). У зв'язку з цим були розглянуті корпуси з різними значеннями діаметрів корпусу і штуцера, що вварюється без зміцнення отвору. Товщина досліджених корпусів становила від 8 до 16 мм.

У таблицях 2.7 – 2.13 представлені результати виміру максимального  $D_{max}$  і мінімального  $D_{min}$  діаметрів корпусів апаратів до і після приварки штуцера, а також розрахунок відносної овальності корпусу до приварки штуцера  $a_0$ , після приварки штуцера  $a$ , і зміна овальності корпусу апарата після зварювання  $\Delta a$ , з зазначенням співвідношення діаметра приварюваного патрубка до діаметру корпусу апарату  $d/D$ .

Таблиця 2.7 - Виміри овальності до і після приварювання патрубка до  $\varnothing 273 \times 7$  мм в корпус апарату до  $\varnothing 530 \times 10$  мм, співвідношення  $d/D = 0,52$

Корпус апарату		$D_{max}, \text{мм}$	$D_{min}, \text{мм}$	$a_0, \%$	$a, \%$	$\Delta a, \%$
1	до приварки	532	529	0,57	2,26	1,69
	після приварки	538	526			
2	до приварки	534	530	0,75	2,82	2,07
	після приварки	540	525			
3	до приварки	532	528	0,75	2,64	1,89
	після приварки	537	523			
4	до приварки	533	528	0,94	2,82	1,87
	після приварки	540	525			
5	до приварки	532	527	0,94	2,64	1,69
	після приварки	538	524			
Середнє значення				0,79	2,63	1,84

Вимір діаметрів проводився металевою рулеткою з похибкою 0,5 мм з відкритого торця обичайки, тому розрахунок відносної овальності відповідно ГОСТ Р 52630-2006 здійснювався за формулою (2.1).

Таблиця 2.8 – Вимірювання овальності до і після приварки патрубка  $\varnothing 159 \times 8$  мм в корпус апарату  $\varnothing 630 \times 16$  мм, співвідношення  $d/D = 0,25$

Корпус апарату		$D_{max}, \text{мм}$	$D_{min}, \text{мм}$	$a_0, \%$	$a, \%$	$\Delta a, \%$
1	до приварки	632	629	0,48	1,27	0,79
	після приварки	634	626			
2	до приварки	633	629	0,63	1,90	1,27
	після приварки	636	624			
3	до приварки	632	628	0,63	2,06	1,43
	після приварки	637	624			
4	до приварки	631	628	0,48	1,74	1,27
	після приварки	632	629			
Середнє значення				0,56	1,75	1,19

Таблиця 2.9 – Вимірювання овальності до і після приварки патрубка  $\varnothing 127 \times 6$  мм в корпус апарату  $\varnothing 720 \times 8$  мм, співвідношення  $d/D = 0,18$

Корпус апарату		$D_{max}, \text{мм}$	$D_{min}, \text{мм}$	$a_0, \%$	$a, \%$	$\Delta a, \%$
1	до приварки	723	719	0,55	1,66	1,11
	після приварки	727	715			
2	до приварки	723	721	0,28	1,53	1,25
	після приварки	726	715			
3	до приварки	724	719	0,69	1,80	1,11
	після приварки	729	716			
4	до приварки	723	720	0,42	1,94	1,52
	після приварки	730	716			
5	до приварки	722	718	0,56	0,97	0,42

	після приварки	723	716			
6	до приварки	722	720	0,28	1,39	1,11
	після приварки	723	719			
Середнє значення				0,46	1,55	1,09

Таблиця 2.10 – Вимірювання овальності до і після приварки патрубкa  $\varnothing 426 \times 10$  мм в корпус апарату  $\varnothing 630 \times 16$  мм, співвідношення  $d/D = 0,68$

Корпус апарату		$D_{max}, мм$	$D_{min}, мм$	$a_0, \%$	$a, \%$	$\Delta a, \%$
1	до приварки	632	630	0,32	3,01	2,69
	після приварки	641	622			
2	до приварки	632	629	0,48	3,01	2,54
	після приварки	640	621			
3	до приварки	633	631	0,32	2,85	2,53
	після приварки	641	623			
4	до приварки	631	628	0,48	2,70	2,22
	після приварки	638	621			
Середнє значення				0,40	2,89	2,49

Таблиця 2.11 – Вимірювання овальності до і після приварки патрубкa  $\varnothing 89 \times 6$  мм в корпус апарату  $\varnothing 720 \times 8$  мм, співвідношення  $d/D = 0,12$

Корпус апарату		$D_{max}, мм$	$D_{min}, мм$	$a_0, \%$	$a, \%$	$\Delta a, \%$
1	до приварки	720	719	0,14	0,55	0,42
	після приварки	723	719			
2	до приварки	722	720	0,28	0,55	0,28
	після приварки	723	719			
3	до приварки	722	720	0,28	0,69	0,42
	після приварки	724	719			
4	до приварки	721	720	0,14	0,42	0,28
	після приварки	723	720			

Середнє значення	0,21	0,55	0,34
------------------	------	------	------

Таблиця 2.12 – Вимірювання овальності до і після приварки патрубку  $\varnothing 203 \times 8$  мм в корпус апарату  $\varnothing 2000 \times 8$  мм, співвідношення  $d/D = 0,1$

Корпус апарату		$D_{max}, мм$	$D_{min}, мм$	$a_0, \%$	$a, \%$	$\Delta a, \%$
1	до приварки	2021	1992	1,45	1,60	0,15
	після приварки	2022	1990			
2	до приварки	2018	1998	1,00	1,15	0,15
	після приварки	2020	1997			
3	до приварки	2012	1993	0,95	1,20	0,25
	після приварки	2016	1992			
4	до приварки	2019	2002	0,85	1,04	0,20
	після приварки	2021	2000			
Середнє значення				1,06	1,25	0,19

Таблиця 2.13 – Вимірювання овальності до і після приварки патрубку  $\varnothing 720 \times 8$  мм в корпус апарату  $\varnothing 2000 \times 8$  мм, співвідношення  $d/D = 0,36$

Корпус апарату		$D_{max}, мм$	$D_{min}, мм$	$a_0, \%$	$a, \%$	$\Delta a, \%$
1	до приварки	2022	1990	1,60	3,29	1,69
	після приварки	2039	1973			
2	до приварки	2020	1997	1,15	2,99	1,85
	після приварки	2035	1975			
3	до приварки	2016	1992	1,20	3,05	1,85
	після приварки	2033	1972			
4	до приварки	2021	2000	1,04	2,44	1,40
	після приварки	2030	1981			
Середнє значення				1,25	2,94	1,69



За результатами проведених вимірів, для наочності отриманих результатів побудовано графік залежності відносної овальності після приварювання штуцерів і зміни овальності  $\Delta a$  від співвідношення діаметра ввариваемого патрубку до діаметру корпусу (рисунок 2.12).

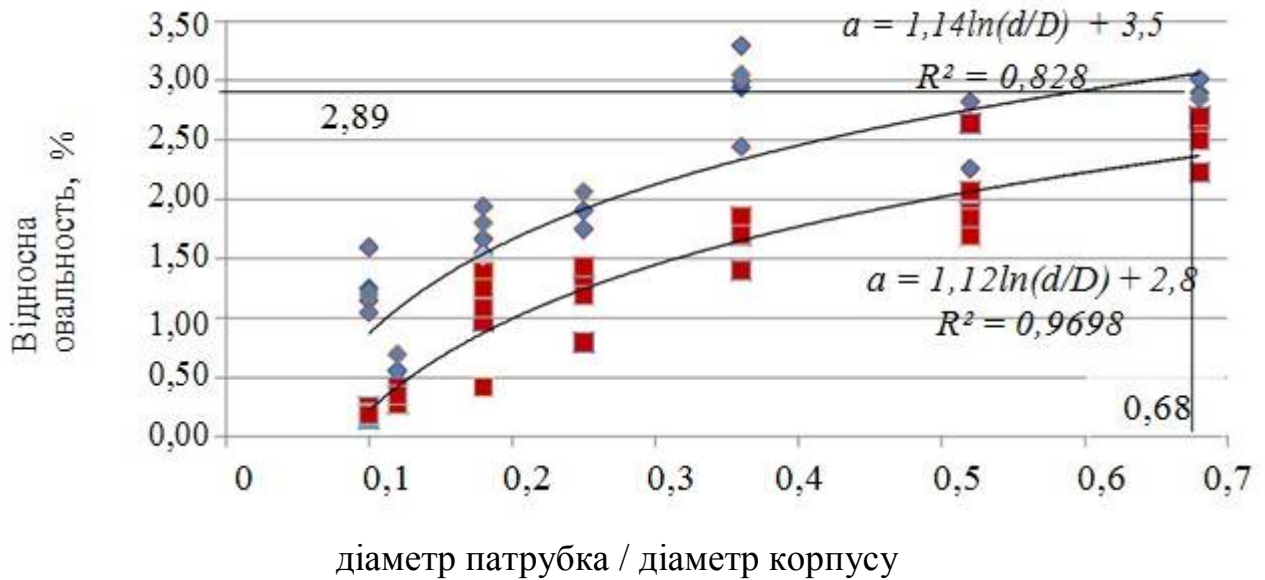


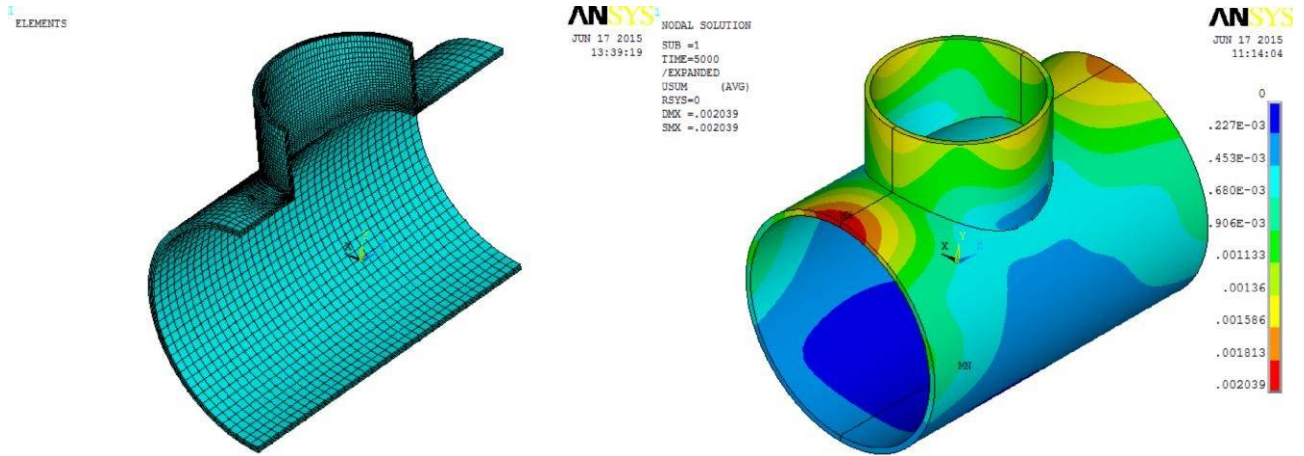
Рисунок 2.12 - Графік залежності відносної овальності  $a$  і зміни овальності  $\Delta a$  корпусів апаратів після приварювання штуцерів від співвідношення діаметра ввариваемого патрубку до діаметру корпусу  $d/D$

Як показують результати вимірювання овальності корпусів апаратів, схильних до значних деформацій внаслідок приварки штуцерів поблизу торця обичайки (відстань від штуцера до торця обичайки не більше 300 мм) збільшення відношення діаметра ввариваемого штуцера до діаметра обичайки до 0,68 веде до підвищення відносної овальності корпусу апарату до 2,89%. При цьому, у разі застосування дугових способів зварювання для сталі 09Г2С зміна відносної овальності після зварювання зварювання в інтервалі співвідношення діаметрів від 0,1 до 0,7 з високим ступенем достовірності описується апроксимуючої логарифмічною функцією  $a = 1,12 \ln(d/D) + 2,8$ .

При цьому, у разі застосування дугових способів зварювання для сталі 09Г2С зміна відносної овальності після зварювання в інтервалі співвідношення діаметрів від 0,1 до 0,7 з високим ступенем достовірності  $R^2 = 0,9698$  описується апроксимуючої логарифмічною функцією  $a = 1,12 \ln(d/D) + 2,8$ .

### **2.3.1 Моделювання зміни овальності, що виникає після приварки патрубку**

З метою теоретичної оцінки зміни овальності корпусу, виникаючій після приварки патрубка в результаті зварювальних деформацій конструкції, проведено звичайно елементне моделювання в програмному комплексі ANSYS (рисунок 2.13). Метод кінцевих елементів дозволяє врахувати реальне поширення і зміна температурних полів і виникають при цьому пластичні деформації і зміцнення. В результаті розрахунку визначена величина максимальних переміщень і відносної овальності для з'єднання корпусу діаметром 630 мм і товщиною 16 мм зі штуцером діаметром 420 мм і товщиною 16 мм. Розрахункова модель складається з об'ємних восьмивузлових елементів. Механічні та теплофізичні властивості матеріалу задавалися залежними від температури. Враховуючи симетрію геометрії та умов нагромадження, моделювання виконано для половини корпусу та штуцера із завданням граничної умови симетрії для вузлів, що належать площині YZ. Спільний розрахунок, який застосовується для розрахунку термомеханічних напруг, передбачає рішення завдання в два етапи: на першому етапі в якості навантаження задається нестационарна температура зварного шва і розраховуються температурні поля, на другому етапі - розподіл температури визначається в якості навантаження, і розраховуються переміщення, напруження і деформації, обумовлені зміною температури і тепловим розширенням матеріалу.



а) геометрична модель

б) розподіл деформацій в корпусі апарату

Рисунок 2.13—Оцінка овальності корпусу апарату з патрубком ввареним

Результати розрахунку показують, що характер зміни овальності корпусу при приварюванні патрубка ідентичний практичним результатами. Відмінність в значеннях обумовлено складністю моделювання всього циклу процесів виготовлення попередніх зварюванні, при яких формується напружено-деформований стан металу корпусу.

### **3 АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЙНОГО ВПЛИВУ НА ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ**

#### **3.1 Аналіз впливу вібраційного впливу на властивості металу**

Процеси, що протікають при вібраційному впливі на метал, можна розділити на кілька груп: обробка рідкого розплаву металу, обробка кристалізуємого металу і обробка закристалізованого (остиглого) металу.

При вібраційному впливі на рідкий метал позитивними результатами є: збільшення теплопровідності за рахунок перемішування, дегазація, підвищення глибини проплавлення, перерозподіл включень і хімічних (легуючих елементів по об'єму розплаву, підвищення тепловіддачі з поверхні ванни, підвищення плинності.

До негативних моментів відносяться: збільшення контакту з навколишнім повітрям, освіта нерівностей і виплеск на поверхні металу, виникнення пропалів зварного шва.

При впливі на закристалізований метал до позитивних результатів відносяться: подрібнення мікроструктури за рахунок руйнування фронту кристалізації і переміщення нових центрів кристалізації, а також за рахунок зниження міжфазного поверхневого натягу металу зварювальної ванни і в'язкості розплаву.

До негативних моментів можна віднести появу гарячих кристалізаційних тріщин, пористість і ін.

У разі вібраційного впливу на затверділий метал достоїнствами є зниження зварювальних напруг і деформацій у зварних конструкціях і підвищення розмірної геометричної стабільності виробу в цілому.

Однак, перевищення значень режимів вібраційної обробки може викликати появу тріщин, зниження ударної в'язкості металу шва та інших характеристик металу.

### **3.2 Вплив режимів вібраційного впливу на ефективність процесу зняття зварювальних напруг і деформацій**

Відмінною рисою процесу кристалізації зварювальної ванни від литої заготовки є високі швидкості охолодження і малий обсяг розплавленого металу. Особливість структурних перетворень при зварюванні полягає в тому, що вони відбуваються в нерівноважних умовах термодформаційного зварювального циклу, тобто в умовах нагрівання до температур плавлення металу при високих швидкостях нагрівання і охолодження металу, в умовах розвитку зварювальних деформацій і напружень [14, 40, 69].

Перетворення в даних умовах при кожній поточній температурі не встигають пройти до кінця порівняно з рівноважним станом, відповідним цій температурі, що призводить, при певній ступеня перегріву або охолодження до збереження частини початкової фази. Характер перетворень залежить від хімічного складу сплаву, температури нагріву, а їх завершеність визначається параметрами термодформаційного зварювального циклу [69].

Кристалізація металу при зварюванні має певний спрямований характер, обумовлений відведенням теплоти в основний метал і навколишнє середовище, внаслідок високої різниці температур при локальному впливі джерел теплоти. В результаті в зварювальній ванні, як правило, починають рости стовпчасті кристали, що ростуть від частково оплавлених зерен основного металу до центру металу шва.

У деяких випадках в центральній частині шва можливе утворення рівновісних кристалів, зростання яких відбувається східчасто внаслідок освіти періодичних зон термічного або концентраційного переохолодження біля фронту кристалізації з боку рідкого розплаву.

У процесі дугового зварювання при охолодженні зварного шва утворюється стовпчаста кристалічна структура. В залежності від теплових і кінетичних процесів, що відбуваються в процесі кристалізації металу шва, в залежності від хімічного складу розплаву, градієнта температури в різних

частинах зварного з'єднання можливе утворення равноосной мікроструктури, яка в свою чергу, може бути комірчастою, пористо-дендритної, дендритної.

Таким чином, можна отримати різні структури в шві і управляти їх розвитком. Дане явище необхідно врахувати при розробці технології вібраційного впливу на зварювальну ванну.

В роботі Салміна А. Н. [109] було виявлено, що віброобробка зварного шва в процесі зварювання з полічастотними коливаннями дає кращий ефект. Полічастотні коливання з'являлися в зварюваному виробі випадково, при створенні вібраційних коливань пневматичним кульковим вібратором ВШ-10.

Необхідно відзначити, що вібраційна обробка зі зміною частоти широко відома на сьогоднішній день і достатньо описана в роботах В. М. Сагалевича [104-108], а також у роботах інших вчених [6, 21, 26, 31, 34-36, 38-39, 40-41, 90-91, 96, 98, 101, 113, 121, 133-134]. Однак, робіт з використання вібраційного впливу в процесі зварювання на змінюються режимах практично немає.

У роботах присвячених віброобробки в процесі зварювання, як правило, зазначаються постійні режими коливань, при цьому для дугового зварювання оптимальна частота вказується в діапазоні від 50 до 400 Гц, амплітуда вібрації не вище 1 мм [49, 80-81, 118-119, 129-131].

У роботах Єфімова В. А. і Эльдарханова А. С. [40, 135-138] висловлена гіпотеза про те, що ефективність вібраційного та ультразвукового впливу на розплавлений метал пов'язана з вводиться в розплав механічною енергією.

Проведені вищезгаданими дослідниками численні дослідження формування структури металу, показали, що застосування вібрації при затвердінні супроводжується утворенням на межі кристалізації великої кількості уламків дендритів і виникненням у розплаві додаткових центрів кристалізації.

Розглядаючи дане питання з цієї позиції, технологія вібраційного впливу на ванну рідкого металу це введення в розплав додаткової енергії пружних хвиль, яка визначається як

$$dF_{\text{виб}} = 0,5 \omega^2 \cdot A^2 \cdot \rho \cdot dV, \quad (3.1)$$

де  $\rho = dm/dV$  - щільність середовища,  $m$  - маса частинки в об'ємі  $dV$ ;  
 $\omega$ ,  $A$  - частота і амплітуда пружних хвиль відповідно.

Залежно (3.1) впливає, що збільшення енергії вібраційного впливу сприяють підвищення частоти і амплітуди вібрації, а також щільності середовища.

Величина вільної енергії системи, що піддається вібрації, визначається за такою формулою

$$\Delta F = F + F_{\text{виб}} - S(T_1 - T_2) - \sigma \cdot \alpha \sigma, \quad (3.2)$$

де  $\Delta F$  - вільна енергія системи;

$F$  - внутрішня енергія системи;

$S$  - ентропія системи;

$T_1$ ,  $T_2$  - температури рідкого і твердого станів системи;

$\sigma$  - поверхнева енергія на кордоні фаз " кристал-рідина»;

$\alpha \sigma$  - сумарна площа поверхонь всіх кристалів (гілок дендритів та ін.).

З формули (3.2) видно, що з підвищенням потужності вводяться коливань відбувається збільшення вільної енергії системи, яка при формуванні кристалічних структур в процесі застигання металу витрачається на обламування гілок дендритів і створення в системі додаткових центрів.

У роботах Файрушина А. М. та ін [129-130] показано, що обробка з амплітудою коливань вище 1 мм призводить до зниження технологічної міцності зварного з'єднання, виникають гарячі тріщини, пори і інші дефекти.

Таким чином, з метою підвищення ефективності вібраційного впливу необхідно підвищити енергію системи, при обмеженій амплітуді і частоті. З теорії поширення хвиль відомо, що це можливо зробити за рахунок використання модульованих режимів [8, 68, 142].

Для передачі сигналів на великі відстані необхідно, щоб вони володіли великою енергією. Реалізується це шляхом "накладання" одного сигналу коливання на інший, який має іншу частоту коливань, сигнал стає модульованим.

Залежно від того, який параметр змінюють, розрізняють амплітудну, частотну і фазову модуляцію.

Амплітудно-модульовані режими (АМР). При амплітудній модуляції утворюється сигнал, у якого амплітуда змінюється (модулюється) за законом сигналу, в якому міститься інформація. Частота несучого сигналу при амплітудній модуляції залишаються незмінними.

АМР виходить шляхом перемноження двох сигналів. Один містить інформацію, а інший є несучим. Нехай модулююче (рисунок 3.1) і несуче коливання (рисунок 3.2) змінюються відповідно до наступних виразів:

$$U_1(t) = U_0 + U_{1m} \cos \Omega t, \quad (3.3)$$

$$U_2(t) = U_2m \cos t, \quad (3.4)$$

де  $U_0$  – постійна складова сигналу,

$U_{1m}$  і  $U_{2m}$  – амплітуди модулюючого і несучого коливання,

$\Omega$ ,  $\omega$  - частота модулюючого і несучого коливання.

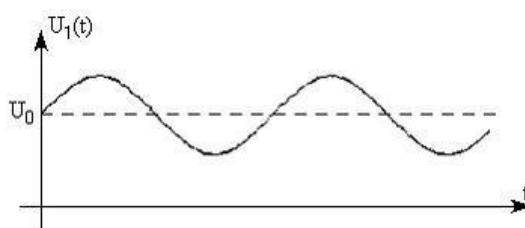


Рисунок 3.1 - Модулююче коливання

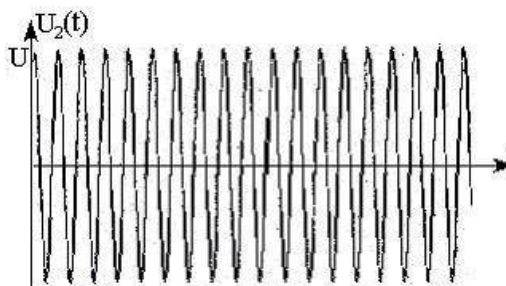


Рисунок 3.2 - Несуче коливання



Перемножимо ці сигнали:

$$U_{am}(t) = U_1(t)U_2(t) = (U_0 + U_{1m}\cos\Omega t)(U_{2m}\cos\omega t) = U_0U_{2m}\cos\omega t + \frac{1}{2}U_{1m}U_{2m}\cos(\omega + \Omega)t + \frac{1}{2}U_{1m}U_{2m}\cos(\omega - \Omega)t \quad (3.5)$$

Введемо позначення:

$$U_m = U_0U_{2m} \quad (3.6)$$

$$M = \frac{U_{1m}U_{2m}}{U_0U_{2m}}, \quad (3.7)$$

де  $U_m$ -амплітуда промодульованого сигналу,  
 $M$  – коефіцієнт модуляції.

З урахуванням введених позначень, отримаємо вираз для АМР в наступному вигляді:

$$U_{am}(t) = U_m\cos\omega t + \frac{1}{2}U_mM\cos(\omega + \Omega)t + \frac{1}{2}U_mM\cos(\omega - \Omega)t \quad (3.8)$$

Вид АМР показаний на рисунку 3.3.

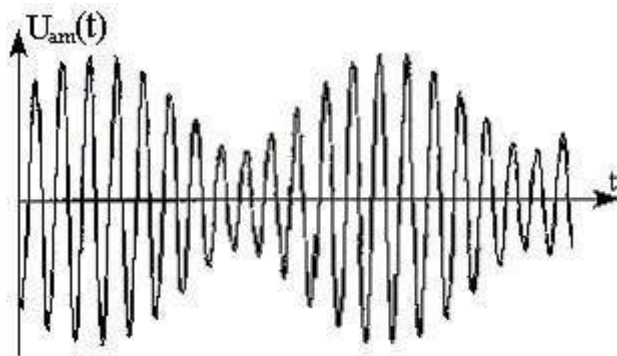


Рисунок 3.3 Амплітудно - модульований режим

Частотно-модульований режим (ЧМР). Частотно-модульований режим - це коливання, у якого миттєва частота змінюється за законом модулюючого сигналу. Модулюючий сигнал і несуче коливання змінюються, як показано на рисунках 3.4, 3.5.

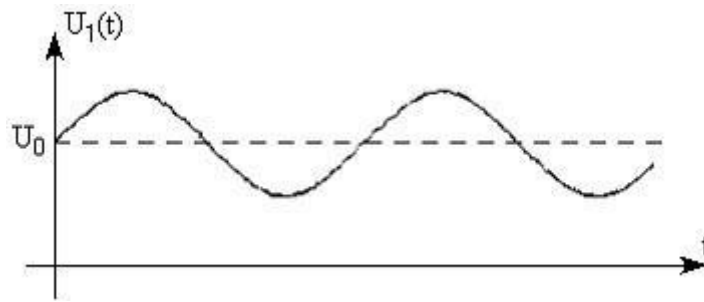


Рисунок 3.4 - Модуючий сигнал

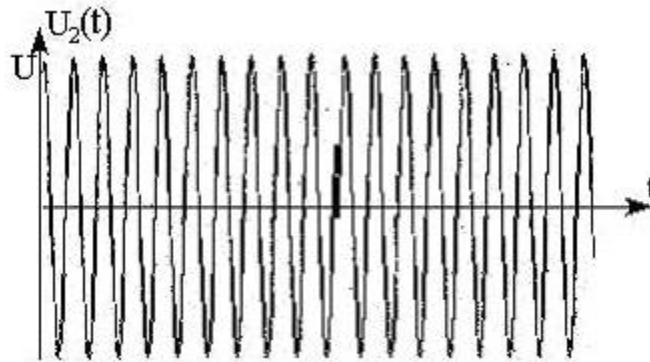


Рисунок 3.5 - Несучий сигнал

Миттєва частота при частотній модуляції дорівнює:

$$\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega \cos\Omega t \quad (3.9)$$

де  $\Delta\omega$  - девіація (відхилення) частоти під дією модулюючого сигналу, це відхилення пропорційно амплітуді модулюючого коливання. Миттєву фазу частотно-модульованого режиму знайдемо, проінтегрувавши  $\omega(t)$  по часу:

$$\varphi(t) = \int \omega(t) dt = \omega_0 t + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sin\Omega t \quad (3.10)$$

Відповідно до рис. 2.21 і виразом (2.59) частотно-модульоване коливання запишеться в наступному вигляді:

$$U_{1m}(t) = U_m \cos(\omega_0 t + m \sin\Omega t), \quad (3.11)$$

де  $\frac{\Delta\omega}{\Omega} = m$  - є індекс частотної модуляції. Вид частотно-модульованого режиму показаний на рисунку 3.6.

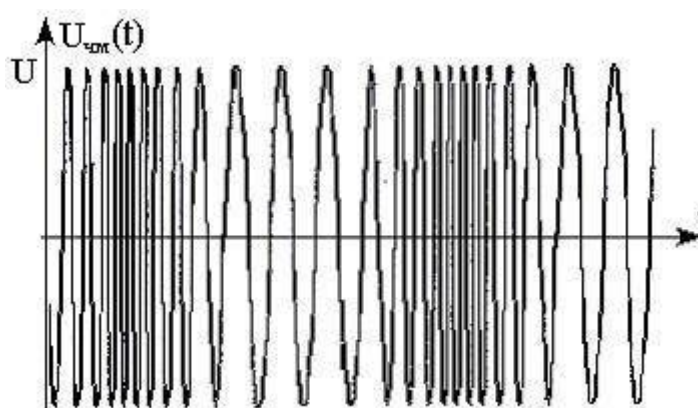


Рисунок 3.6 - Частотно – модульований режим

Частотно-модульований режим є водночас і фазомодульованим. При частотній модуляції зміна частоти, а не фази збігається з законом зміни модулюючого сигналу. При частотній модуляції Індекс модуляції обернено пропорційний модулюючої частоті, тоді як при фазовій модуляції такої залежності немає.

### **3.3 Вибір технологічного обладнання та визначення режимів вібраційної обробки**

У заводських умовах приварювання різних елементів корпусу здійснюється ручним дуговим зварюванням покритими електродами або напівавтоматичним зварюванням у середовищі вуглекислого газу зварювальної дротом з того ж матеріалу, що й основний метал. Для проведення експерименту був обраний зварювальний апарат (випрямляч Cemont ArcoTech TX 1601) для ручного дугового зварювання, який дозволяє здійснювати зварювання при токах до 160А.

Для здійснення вібрації на різних режимах використовували вібростенд ВЕРС-400 (рисунок 3.7). Вібростенд ВЕРС-400 використовується для проведення випробування різних конструкцій на віброміцність і вібростійкість. ВЕРС-400 входять в параметричний ряд уніфікованих віброустановок, виконані за модульним принципом з використанням мікропроцесорної, напівпровідникової і цифрової сучасної елементної бази фірми LDS (Англія).

Управління режиму вібрації здійснюється апаратурою СОМЕТ (Англія) дозволяє проводити випробування конструкцій на вплив синусоїдальної, широкосмугової випадкової вібрації. Завдання режимів випробувань здійснюється від персонального комп'ютера з ліцензійним програмним забезпеченням.

Таблиця 3.1-Технічні характеристики вібростенда ВЕРС-400

Характеристика	Значення
Виштовхувальна сила, Н	4000
Робочий діапазон в, Гц	номінальний 20-1500 розширений 5-3500
Максимальне прискорення, м/с <sup>2</sup>	400
Максимальне переміщення столу, мм	+/- 4,5
Маса нагрузки, кг	максимальна 90
Споживана потужність (від мережі 380/220 В, 50 Гц), Вт	9000

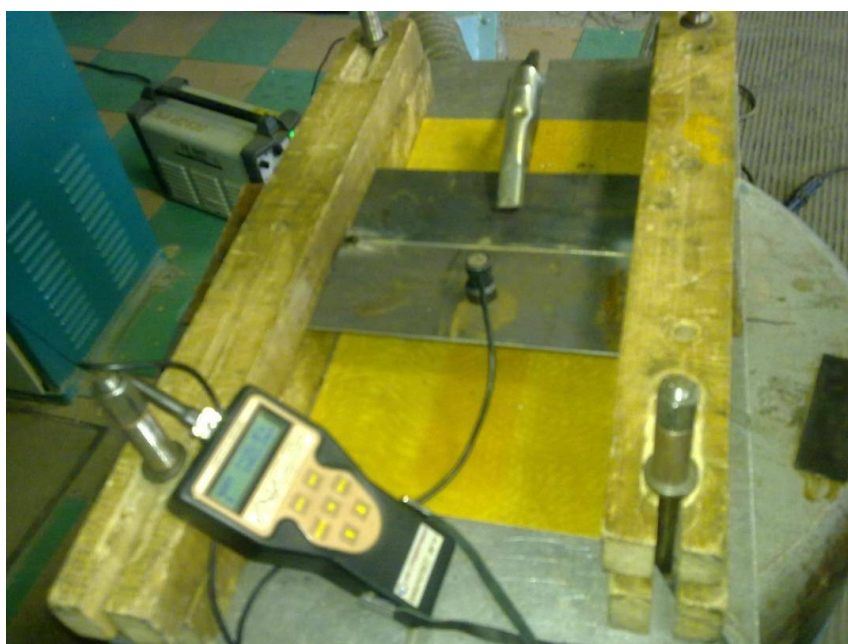


Рисунок 3.7 - Фото зразка закріпленого на вібростенді ВЕРС-400 перед зварюванням

Необходимые режимы обработки задавали непосредственно на пульте управления. Сверку соответствия режимов производили с помощью виброизмерительного прибора «Вибротест-МГ4+».

Технічні характеристики приладу "Вібротест МГ4 +" представлені в таблиці 3.2

Таблиця 3.2-Технічні характеристики вібровимірювального приладу " Вібротест-МГ4+»

Характеристика	Значення
Діапазон вимірювання частоти, Гц	2 - 1000
Діапазон вимірювання амплітуди вібропереміщення, мм	0,01 - 20
Діапазон вимірювання віброприскорення, м/с <sup>2</sup>	2 - 400
Діапазон вимірювання віброшвидкості, мм/с	3,3 - 9000
Похибка вимірювання амплітуди, %	+ 5
Похибка вимірювання віброшвидкості, %	± 5
Похибка вимірювання віброприскорення, %	± 5
Час одного виміру, с	12
Габаритні розміри електронний блок, мм	175×90×30
Час безперервної роботи приладу, г	25
Маса приладу з віброперетворювачем, кг	0,35

Параметри вібрації заміряли поблизу зварного з'єднання в декількох точках. Розкид значень склав не більше 10%.

Для дослідження були обрані 4 режими:

- режим 1 «без обробки»: зварювання без вібраційного впливу (існуючий варіант);

- режим 2 "віброобробка": зварювання з супутньою вібраційною обробкою на частоті 50 Гц і амплітудою вібропереміщення до 0,8 мм (варіант, розглянутий у роботах [118-119, 129-130]), ( рисунок 3.8,а);

- режим 3 «віброобработка АМР»: зварювання з супутньою вібраційною обробкою з амплітудно-модульованими характеристиками (частота несучої вібрації 50 Гц, модулюючий сигнал 1 Гц, амплітуда вібропереміщень 0,07...0,3 мм), ( рисунок 3.8,б);

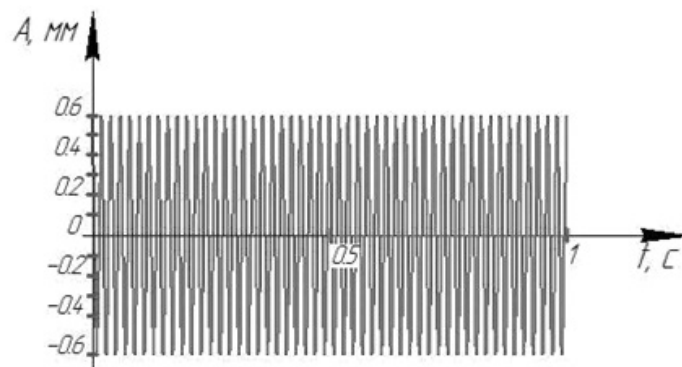
- режим 4 "віброобработка ЧМР": зварювання з супутньою вібраційною обробкою з частотно-модульованими характеристиками (частота вібрації від 50 до 150 Гц, амплітуда вібропереміщень 0,05...0,25 мм) (рисунок 3.8,в);

Керованими параметрами на вібростенді були частота вібрації і виброускарение. Замеряемыми – віброшвидкість, амплітуда вібропереміщень, частота (перевірно).

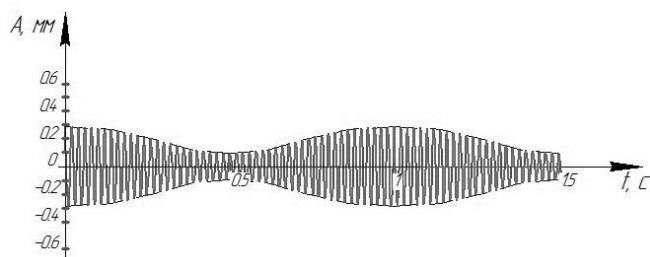
Вводимі з вібростенда коливання характеризуються як лінійні.

Для визначення ефективності технології зменшення зварювальних деформацій і напружень, а також зниження ймовірності утворення холодних тріщин виникає необхідність проведення ряду технологічних і механічних випробувань, які дозволили б показати не тільки рівень деформацій і напружень і визначити наявність або відсутність зниження ймовірності холодних тріщин, але й оцінити зміну різних механічних параметрів зварних з'єднань.

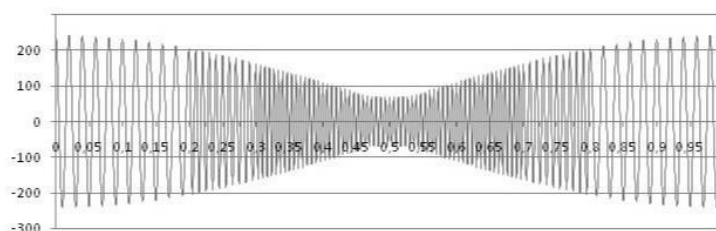
З метою порівняння механічних властивостей отриманих зразків різних ділянок зварного з'єднання проводили випробування на статичний розтяг, ударний вигин, також проводили вимір мікротвердості різних точок зварного з'єднання за ГОСТ 6996.



а) коливання на частоті 50 Гц і амплітуді вібропереміщення до 0,6 мм



б) коливання з амплітудно-модульованими характеристиками



в) коливання з частотно-модульовані характеристиками

Рисунок 3.8 – Режими вібраційної обробки

### 3.4 Вибір контрольованих механічних параметрів зварних з'єднань

З метою визначення пластичних властивостей металу шва і зони сплавлення проводили випробування на ударний вигин на надрізаних зразках з U-подібним надрізом по ГОСТ 6996.

Для виявлення макроструктури та визначення розміру зерна різних ділянок зварного з'єднання проводили полірування з подальшим витравлювання структури. Для сталі 09Г2С з урахуванням рекомендацій наведених в [52] (Реактив №1), використовували 4% спиртовий розчин азотної кислоти.

Для оцінки напружено-деформованого стану зварного з'єднання застосовували рентгеноструктурний аналіз методом дифрактометрії наступною оцінкою ширини піку.

### 3.5 Планування експерименту

У проведених дослідженнях [42, 49-51, 129-131] були розглянуті різні коливання, лінійні і кругові, що прикладаються в різних напрямках щодо зварного шва (поперек, уздовж, в горизонтальному і вертикальному напрямку). В роботі Салміна А. Н. [109] розглядаються також і полічастотні коливання,

при цьому накладення додаткових коливань було побічним і фіксувалося за допомогою віброаналізатора. З різних джерел, що описують поширення електромагнітних хвиль чи коливань систем відомо, про високої ефективності так званих модульованих сигналів (коливань), які значно підвищують потужність сигналу (коливання). На сьогоднішній день немає відомих робіт по впливу дії модульованих коливань на механічні властивості зварного з'єднання. Тому було прийнято рішення розглянути вплив накладаються амплітудно-модульованих і частотно - модульованих коливань на властивості зварного шва.

Амплітуда, згідно з дослідженнями багатьох авторів, є ключовим параметром, що регулює зміну механічних властивостей, при вібрації в 3-х різних станах: розплавленому, кристалізується і затверділому. Багато формули наведені в науковій літературі так чи інакше містять ряд інших параметрів: частоту, віброшвидкість та віброприскорення. Незважаючи на дослідження, прямо заперечують скільки-небудь помітний вплив частоти коливань, деякі автори визнають, що збільшення частоти може інтенсифікувати протікання різних процесів і змінювати фізичні властивості металу, наприклад збільшення частоти збільшує теплопровідність, підвищує інтенсивність коливань, збільшує число центрів кристалізації та ін. Тому порівняльні дослідження проводили на режимах близьких за значеннями до загальновідомих параметрів вібраційної обробки.

Змінюваних факторів у дослідженнях було декілька: у дослідженнях модулювалася амплітуда при постійній частоті, модулювалася частота при постійній інтенсивності коливань (постійному віброускарінні). Напрямок коливань щодо зварного шва у всіх випадках була однакова.

Таким чином, для визначення всіх перерахованих вище залежностей необхідно провести випробування на режимах, зазначених у таблиці 3.3.

Для підвищення точності визначення впливу віброобробки на механічні властивості зварного з'єднання випробування зразків проводимо на подвійній кількості зразків. Для зниження ймовірності помилки була проведена рандомізація.



## 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІБРАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ КОНСТРУКЦІЇ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН І МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

### 4.1 Дослідження впливу вібраційного впливу на напружено-деформований стан зварного з'єднання

Для визначення механічних властивостей зварних з'єднань з листової сталі марки 09Г2С товщиною 4 мм були виготовлені пластини шириною 100 і довжиною 250 мм для подальшого зварювання між собою. Довжини цих ділянок були прийняті рівними 25 мм на початку і 25 мм в кінці з'єднання і служили для закріплення заготовки в прижимах.

З метою виключення безпосереднього контакту зварюваних пластин і поверхні вибростенда заготовки фіксували на ньому через притискні дерев'яні бруски, які стягувалися до вибростенду по кутах кожної з пластин (рисунок 4.1).

Зварювання здійснювалася в нижньому положенні, вид з'єднання 3 4 згідно з ГОСТ 5264-80, електродами Э 50, з маркою покриття УОНИ 13/55 діаметром електрода 3 мм.



Рисунок 4.1 - Фото зразка закріпленого на вибростенді перед зварюванням

У процесі зварювання із застосуванням частотно-модульованих режимів вібраційного впливу на одному із зразків було помічено короткочасне різке збільшення амплітуди коливання, що призвело до розриву зварювальної ванни в проплаве та освіти пропалення (рисунок 4.2)



Рисунок 4.2 - Фото зразка з дефектом "прожог" (зварювання на частотно-модульованому режимі)

За нашим спостереженням, це можна пояснити тим, що в процесі зварювання пластини виникло збіг коливань вибростенда і внутрішніх (власних) коливань зварюваної пластини, що призвело до зростання амплітуди коливання і відповідно до прожогу.

Виявити експериментально частоту коливання, на якому спостерігалось явище резонансу на даній пластині не вдалося, з огляду на те що початкові цілі дослідження були інші. А на повторних зразках даного явища помічено не було.

Після зварювання всі зварювані пластини були перевірені візуально на наявність поверхневих дефектів. Дефектів вигляді пір, тріщин, підрізів і т. д. виявлено не було.

#### **4.1.1 Дослідження впливу вібраційного впливу при зварюванні на рівень зварювальних деформацій**

Дослідження проводили на вищевказаних зразках. Рівень залишкових деформацій визначався за величиною стріли прогину зварених пластин в

поздовжньому напрямку зварного шва і незграбності зварного вузла. Ескіз зразка і вимірювані параметри показані на рисунку 4.3.

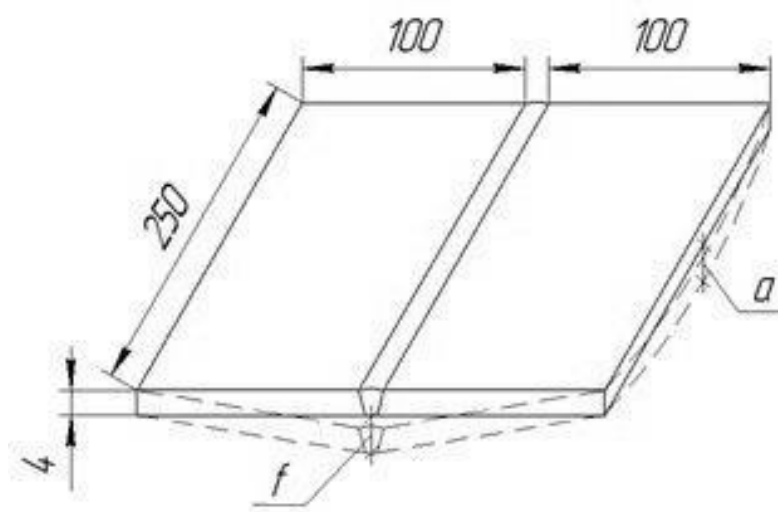


Рисунок 4.3 – Ескіз зразка

Заміряються параметри:  $a$  – стріла прогину;  $f$  – незграбність

Заміри виробляли індикаторним глибиноміром ГІ-100 ГОСТ 7661-67 оснащеним індикатором годинникового типу, встановленим на металевій штанзі. ТЕХНІЧНІ характеристики глибиноміра індикаторного ГІ-100 представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1-Технічні характеристики глибиноміра індикаторного ГІ-100 ГОСТ 7661-67

Характеристика	Значення
Ціна поділки, мм	0,01
Діапазон вимірювань, мм	0-100
Діапазон вимірювань відлікового пристрою, мм	0-10
Габаритні розміри, мм не більш	100×113×26

Результати виміру стріли прогину поздовжньої деформації на базовій довжині 250 мм представлені в таблиці 4.2, виміру стріли прогину незграбності на довжині 200 мм - в таблиці 4.3.

Таблиця 4.2 – Значення стріли прогину поздовжньої деформації зварених зразків, мм

	Без обробки	Віброобробка	Віброобробка АМР	Віброобробка ЧМР
Замір 1	8,34	5,03	3,32	3,86
Замір 2	7,62	5,25	4,12	4,1
Замір 3	7,84	5,18	4,24	3,74
Замір 4	8,12	5,1	3,2	4,22
Середнє значення	7,98	5,14	3,72	3,98

Таблиця 4.3 – Значення стріли прогину незграбності зварених зразків, мм

	Без обробки	Віброобробка	Віброобробка АМР	Віброобробка ЧМР
Замір 1	5,61	3,96	3,52	3,44
Замір 2	6,47	3,78	3,16	3,6
Замір 3	6,12	3,93	3,43	3,58
Замір 4	5,96	3,81	3,25	3,46
Середнє значення	6,04	3,87	3,34	3,52

За результатами вимірів відхилень побудована діаграма, наведена на рисунку 4.4.

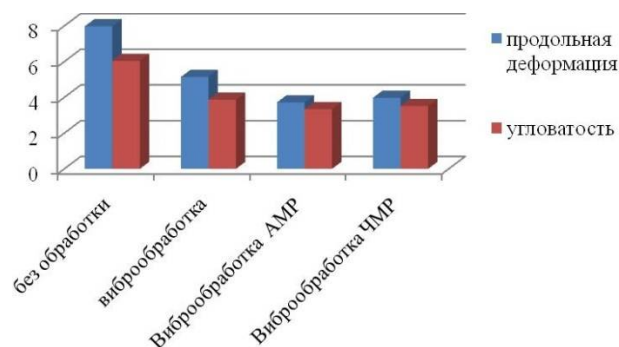


Рисунок 4.4 – Значення стріли прогину зразків при різних режимах обробки, мм

Результати проведених експериментів (рисунок 4.4) показують, що найбільший рівень залишкових деформацій виникає при зварюванні пластин

без обробки, середня глибина прогину поздовжньої деформації становить 7,98 мм і незграбності - 6,04 мм. При зварюванні пластин з частотою 50 Гц і амплітудою від 0,6 до 0,8 мм середня глибина прогину поздовжньої деформації дорівнює 5,14 мм, незграбності - 3,87 мм, що відповідно нижче на 36,6% і 25%. При зварюванні пластин з вібраційною обробкою на амплітудно-модульованих режимах стріла прогину зменшується відповідно на 53% і 45%, а при використанні віброобробки на частотно-модульованих режимах на 50% і 42% у порівнянні з застосуванням зварювання без обробки.

#### **4.1.2 дослідження впливу вібраційного впливу на величину залишкових напруг в процесі зварювання**

Рентгеноструктурний аналіз зразків проводився на рентгенівському дифрактометрі ДРОН 4-07 з виведенням дифракційних даних на персональний комп'ютер. Обробку експериментальних даних проводили з використанням програмного пакету "Maud" (Materials Analysis Using Diffraction). Алгоритм програми використовує порошковий повнопрофільний метод (метод Рітфельда). Результати отриманих даних наведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Результати рентгеноструктурного аналізу зразків

Стан	Рівень мікронапружень, МПа
Зразок №1	204,96±8,72
Зразок №2	175,67±11,1
Зразок №3	169,83±8,75
Зразок №4	187,16±7,13
Основний метал	106,76±6,79

Для наочності отриманих результатів побудована діаграма, наведена на рисунку 4.5.

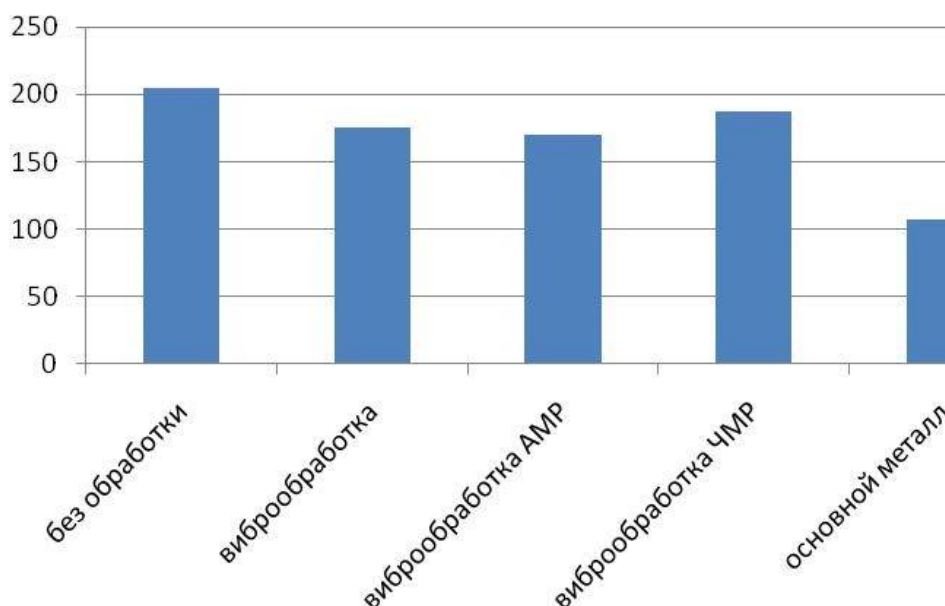


Рисунок 4.5 - Величина внутрішніх напруг в зварному шві, МПа, в залежності від режиму обробки

При проведенні рентгеноструктурного аналізу зразків встановлено, що вібраційна обробка дозволяє знизити рівень внутрішніх напружень в зварному шві на 9...17%, при цьому максимальне зниження напруг виявлено при використанні амплітудно-модульованих режимів.

#### 4.2 Дослідження впливу вібраційного впливу на механічні властивості зварного з'єднання

Широке застосування низьколегованих кремнемарганцевих сталей, яскравим представником класу яких є сталь 09Г2С, обумовлено поєднанням позитивних властивостей: досить високою межею міцності і невеликою схильністю до крихкого руйнування в умовах негативних температур, задовільної зварюваністю і оброблюваністю різанням. Зазначені переваги, в поєднанні з досить високою циклічною міцністю сприяє тому, що ці стали знаходять широке застосування і при виготовленні базових елементів нафтопереробного обладнання. Хімічний склад і механічні властивості досліджуваної сталі наведені в таблицях 4.5 і 4.6.

Таблиця 4.5-хімічний склад сталі 09Г2С (ГОСТ 19281)

Хімічний елемент	%
Азот (N), не більше	0,008
Кремній (Si)	0,5-0,8
Марганець (Mn)	1,3-1,7
Мідь (Cu), не більше	0,30
Мишак (As), не більше	0,08
Нікель (Ni), не більше	0,30
Сірка (S), не більше	0,040
Вуглець (C), не більше	0,12
Фосфор (P), не більше	0,035
Хром (Cr), не більше	0,30

Таблиця 4.6-механічні властивості і значення критичних точок 09Г2С

Межа міцності $\sigma_B$ , МПа	Умовна межа плинності $\sigma_{0,2}$ , МПа	Відносне подовження $\delta_0$ , %	$A_{C1}$ , °C	$A_{C3}$ , °C
470	300	21	725	860

Відповідно до вимог ГОСТ 52630 при зварюванні обичайок і труб, приварюванні днищ до обичайок слід застосовувати стикові шви з повним проплавленням. З огляду на те, що при виготовленні фільтра, використовується або ручне дугове зварювання покритими електродами або напівавтоматичне зварювання в середовищі захисних газів (вуглекислий газ), то в якості виду зварювання для проведення експерименту була обрана ручне дугове зварювання стикових з'єднань пластин товщиною 4 мм, виконувана без оброблення крайок. В якості типу зварного з'єднання був прийнятий тип 3 4 по ГОСТ 5264-80.

#### 4.2.1 Дослідження впливу режимів вібраційного впливу на характеристики статичної міцності металу зварного шва і зварного з'єднання

Механічні властивості зварних швів і з'єднань характеризуються здатністю чинити опір деформації і руйнування під впливом зовнішніх і власних сил в умовах характерної для зварних з'єднань концентрації напруг. Як було показано у другому розділі, застосування атестованих технологій виготовлення зварного ємнісного обладнання не забезпечує стабільність геометричних параметрів форми, яка визначає здатність продукції виконувати свої функції протягом заданого періоду часу, і може стати причиною утворення тріщин в зварних швах.

Для оцінки впливу режимів вібраційного впливу на статичну міцність металу зварного шва і зварного з'єднання за ГОСТ 6996 були виготовлені зразки типу XII (випробування зварного з'єднання на статичний розтяг) і XXIV (визначення міцності металу шва в стиковому з'єднанні). Після чого проведені випробування на статичне розтягнення зразків. Результати випробувань представлені в таблиці 4.7 і 4.8. Також для наочності побудовані діаграми, наведені на малюнках 4.6 і 4.7.

Таблиця 4.7 - результати випробувань зварного з'єднання на статичне розтягнення

№	Вид обробки	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_t$ , МПа
		Ср. знач., МПа	Ср. знач., МПа
1	Без обробки	403	287
2	Віброобробка	416	312
3	Віброобробка АМР	418	306
4	Віброобробка ЧМР	409	303



Руйнування зразків при випробуванні зварного з'єднання незалежно від виду обробки відбувалося як по основному металу, так і по зоні термічного впливу з утворенням «шийки» характерною для пластичних металів. Руйнування зразків при випробуванні зварного шва відбувалося у всіх випадках по зварному шву, в зоні виконаного концентратора.

Таблиця 4.8 – Результати визначення міцності металу шва в стиковому з'єднанні

№	Вид обробки	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа
		Ср. знач.,	Ср. знач.,
1	Без обробки	498	351
2	Віброобробка	532	369
3	Віброобробка АМР	544	358
4	Віброобробка ЧМР	538	363

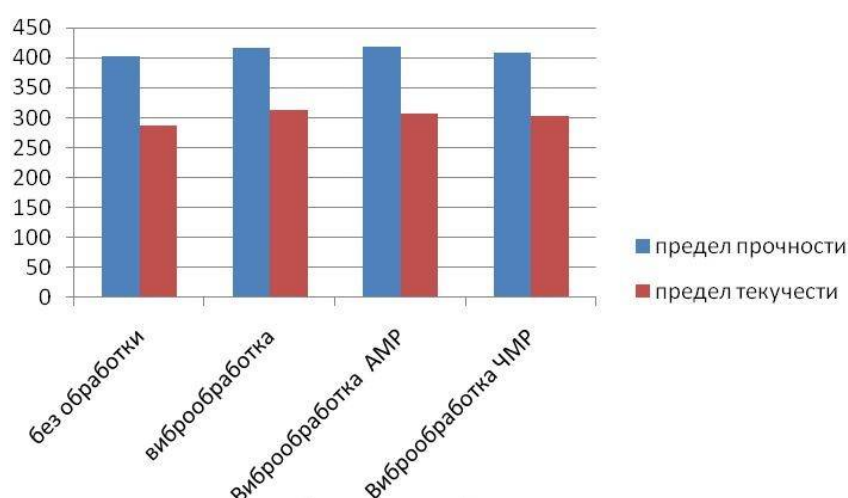


Рисунок 4.6 - Діаграма межі міцності і межі плинності металу зварного з'єднання від виду обробки, МПа

Аналіз одержаних результатів випробувань на статичний розтяг зварних з'єднань і зварних швів показує, що віброобробка дозволяє підвищити механічні властивості зварного шва, так і зварного з'єднання в цілому.

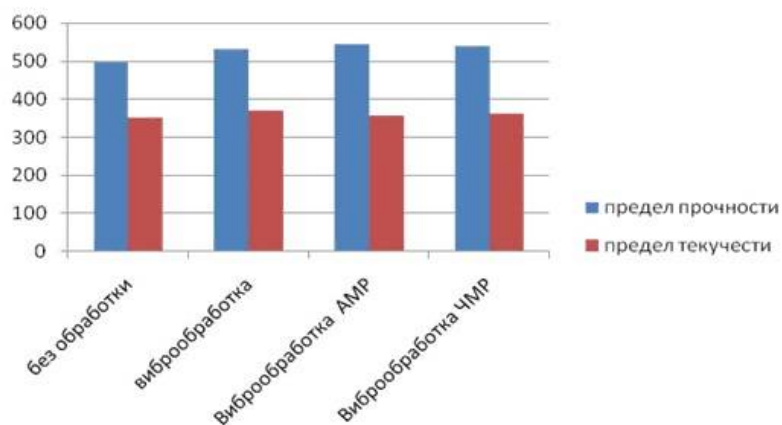


Рисунок 4.7 - Діаграма межі міцності і межі плинності металу зварного шва від виду обробки, МПа

#### 4.2.2 Визначення ударної в'язкості металу шва в стиковому з'єднанні

Випробування металу шва в стиковому з'єднанні на ударний вигин проводилися відповідно до вимог ГОСТ 6996-66. Для визначення впливу режимів вібраційного впливу на опірність руйнування металу при ударних навантаженнях в присутності концентратора були виготовлені зразки типу VIII с U-подібним концентратором в центрі зварного шва. Випробування на ударний вигин проводили в лабораторних умовах при температурі (+19..22 °С). Результати розрахунку середніх значень ударної в'язкості зразків представлені в таблиці 4.9.

Наочно результати визначення ударної в'язкості зразків, представлені на рисунку 4.8.

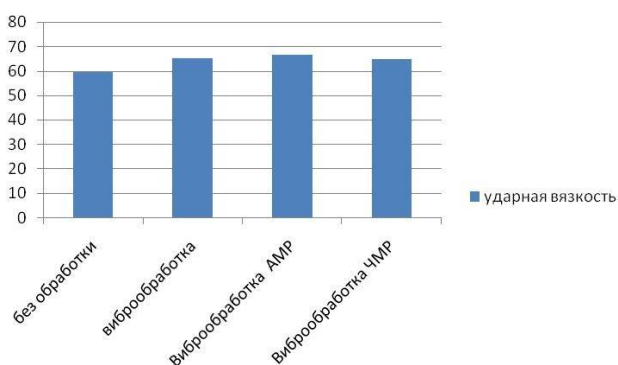


Рисунок 4.8 – Діаграма ударної в'язкості металу зварного шва при температурі +19..21°С від виду супутньої обробки, Дж/см<sup>2</sup>

Таблиця 4.9 - Ударна в'язкість дослідних зразків з U-подібним концентратором

Номер зразка	Ударна в'язкість КСУ, Дж/см <sup>2</sup>		Примітка
	для зразків	ср. знач.	
Зварювання без обробки			
1	60,61	59,60	Надріз в зоні зварного шва
2	54,55		
3	63,64		
З віброобробкой			
4	74,36	64,96	Надріз в зоні зварного шва
5	61,54		
6	58,97		
З віброобробкой АМР			
7	64,10	66,67	Надріз в зоні зварного шва
8	56,41		
9	79,49		
З віброобробкой ЧМР			
10	58,44	64,94	Надріз в зоні зварного шва
11	64,94		
12	71,43		

Аналіз результатів показав незначне збільшення середнього значення ударної в'язкості зразків з U-подібним концентратором. Найбільше збільшення спостерігається при вібраційній обробці на амплітудно-модульованих режимах, зростання ударної в'язкості становить в середньому 11%.

#### 4.2.3 Визначення твердості металу зварного з'єднання

Вимірювання твердості металу проводили на твердомере ТН-600. Виміру піддавалися зварений шов, зона термічного впливу і основний метал.

Результати вимірів твердості наведені на малюнку 4.9.

На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що вібраційний вплив на зварювальну ванну призводить до незначного зниження

твердості як в зоні термічного впливу, так і в зоні зварного шва. У всіх випадках при використанні віброобробки твердість знижується.

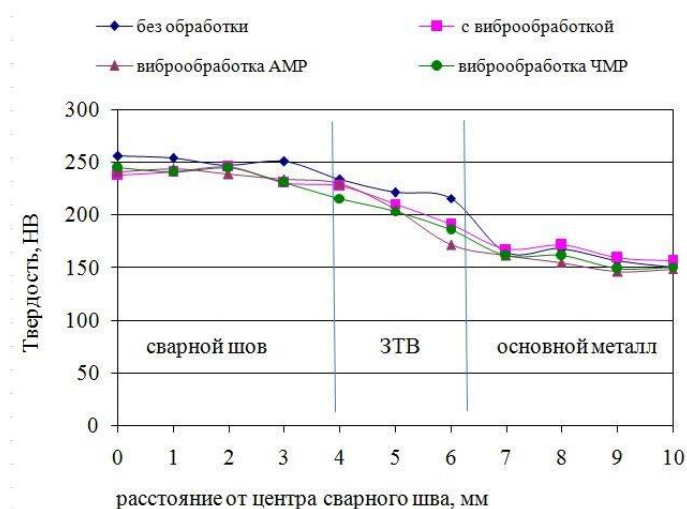


Рисунок 4.9 – Твердість металу зварного з'єднання

### 4.3 Дослідження впливу режимів вібраційної обробки на мікроструктуру шва і околошовної зони

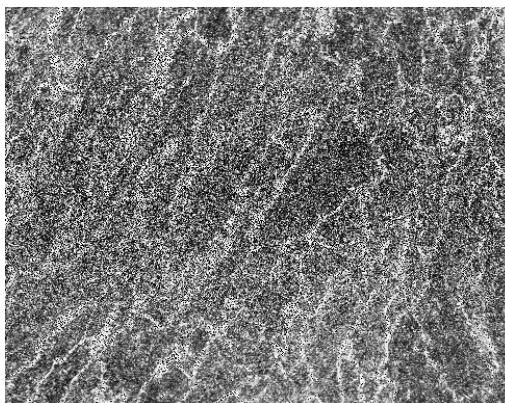
Для визначення впливу вібраційного впливу на структуру металу в зварному шві і околошовній зоні в залежності від виду обробки при зварюванні було проведено металографічне дослідження зразків. Зразки для дослідження мікроструктури готували за методикою, викладеною в ГОСТ 5639-82 та іншій літературі [52]. Спочатку проводили підготовку зразків поетапної шліфуванням на наждачному папері з переходом від великої до більш дрібної. Потім проводилося полірування на різних тканинах (флісі, фланелі, оксамиті) з додаванням пасти ГОІ.

Дослідження мікроструктури проводилися на растровому мікроскопі з різним збільшенням. Фотографії отримували за допомогою спеціального блоку на комп'ютері.

Для сталі 09Г2С з урахуванням рекомендацій наведених в [52] (Реактив №1), використовуємо 4% спиртовий розчин азотної кислоти.

#### 4.3.1 Мікроструктура зварного з'єднання, виконаного без застосування вібраційної обробки

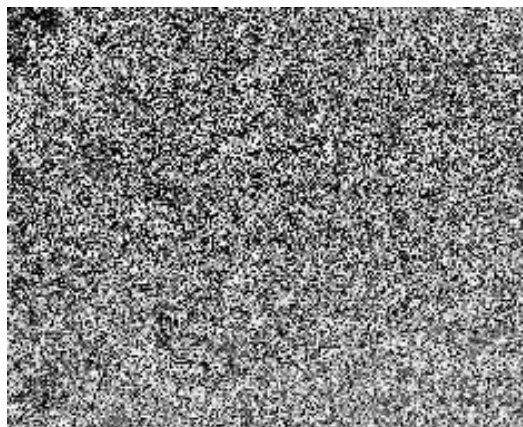
Мікроструктура металу зварного шва, виконаного без супутньої обробки, складається з сорбітообразного перліту (дрібногольчатого) з феритними облямівками і тонкими голками відманштетта, що відходять від феритної сітки всередину зерен. Величина зерна відповідає 1-4 балу шкали по ГОСТ 5639-82 " сталі і сплави. Методи виявлення та визначення величини зерна " (рисунок 4.10).



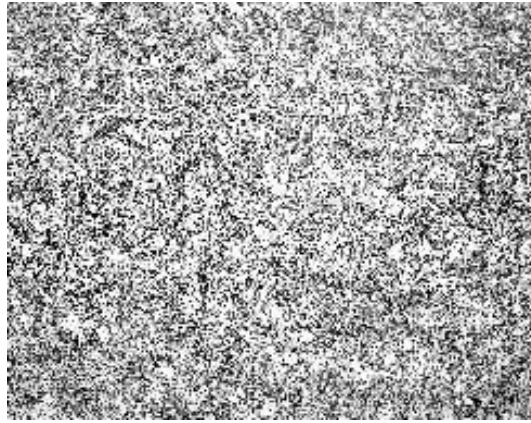
100<sup>x</sup>

Рисунок 4.10 – Фото мікроструктури зварного шва

Мікроструктура металу ділянки перегріву зони термічного впливу складається з фериту і перліту з відманштеттовою орієнтацією 3 бали шкали 4 по ГОСТ 5640-68. Величина зерна відповідає 4-5 балу шкали по ГОСТ 5639-82 (рисунок 4.11).

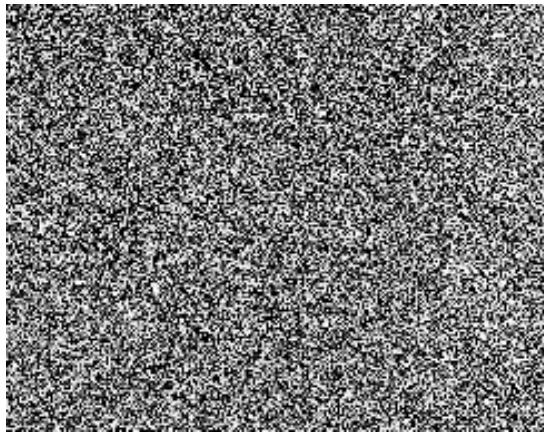


а) 100<sup>x</sup>

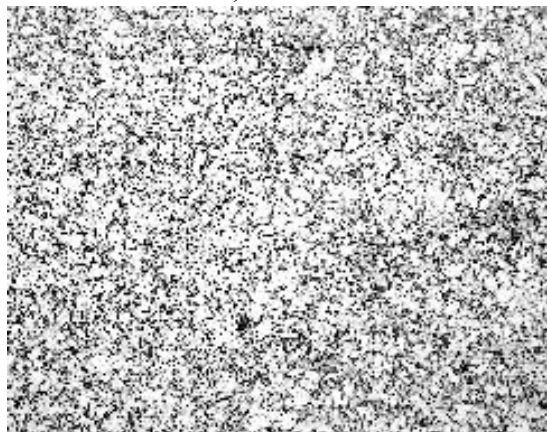


б) 200<sup>x</sup>

Рисунок 4.11 - Фото мікроструктури металу ЗТВ (ділянка перегріву)



а) 100<sup>x</sup>



б) 500<sup>x</sup>

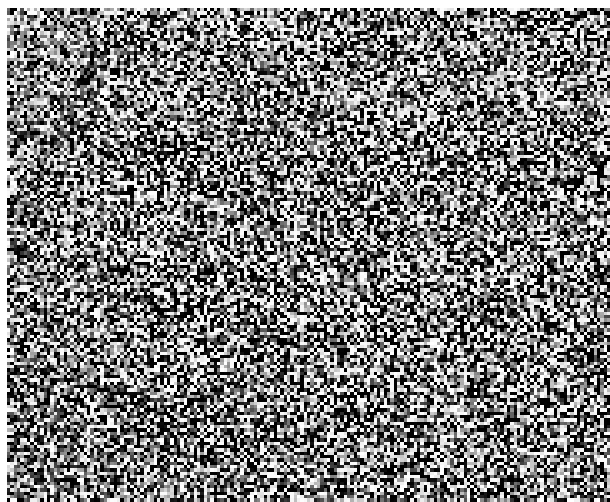
Рисунок 4.12 - Фото мікроструктури металу ЗТВ (ділянка перекристалізації, ділянка дрібного зерна)

Мікроструктура металу ділянки перекристалізації (ділянка дрібного зерна) зони термічного впливу являє собою дрібнозернисту перекристалізовану

ферито-перлітову структуру. Величина зерна відповідає 11 балу шкали по ГОСТ 5639-82 (рисунок 4.12).

Мікроструктура металу ділянки неповної перекристалізації складається з фериту і перліту зі ступенем сфероїдизації 3 бали шкали ОСТ 34-70-690-96 Метал паросилового обладнання електростанцій. Методи металографічного аналізу в умовах експлуатації» (Додатки Е). Величина зерна відповідає 9-10 балом шкали по ГОСТ 5639-82 (Рисунок 4.13).

Мікроструктура основного металу складається з фериту і перліту. Величина зерна відповідає 9 балом шкали по ГОСТ 5639-82 (Рисунок 4.14).



а)  $100^x$



б)  $500^x$

Рисунок 4.13 – Фото мікроструктури металу ЗТВ (ділянка неповної перекристалізації)

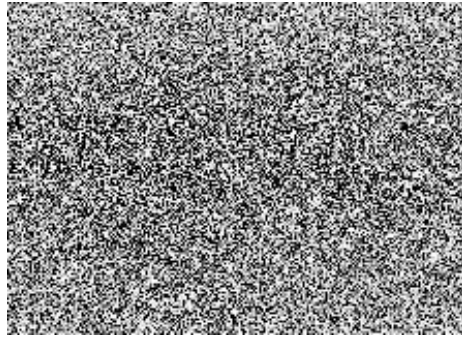
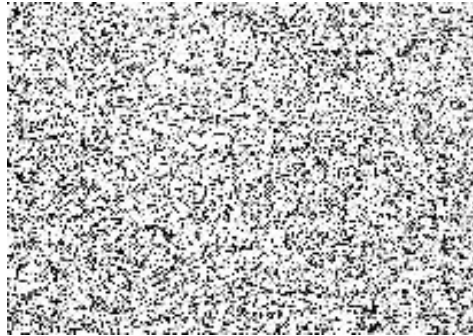
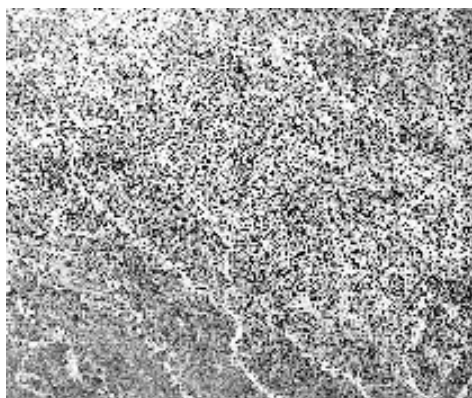
а) 100<sup>x</sup>б) 200<sup>x</sup>

Рисунок 4.14 - Фото мікроструктури основного металу

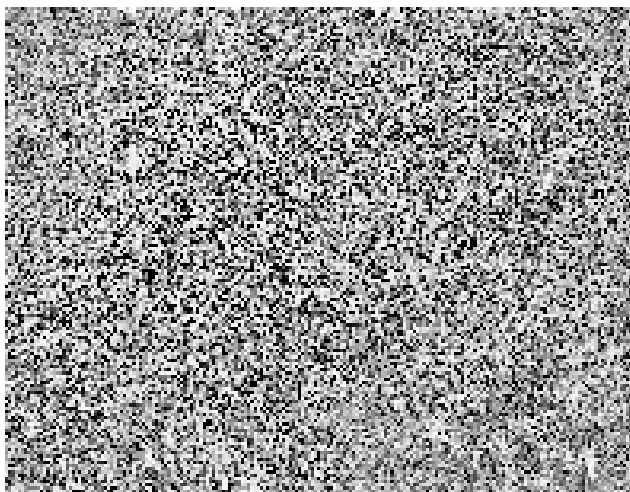
#### **4.3.2 Мікроструктура зварного з'єднання, виконаного із застосуванням вібраційного впливу**

Мікроструктура металу зварного шва складається з сорбітообразного перліту (дрібногольчатого) з феритними облямівками і тонкими голками відманштетта, що відходять від феритної сітки всередину зерен. Величина зерна має розмір вище 1 бала до 4 бала шкали по ГОСТ 5639-82 " сталі і сплави. Методи виявлення та визначення величини зерна " (Рисунок 4.15).

100<sup>x</sup>



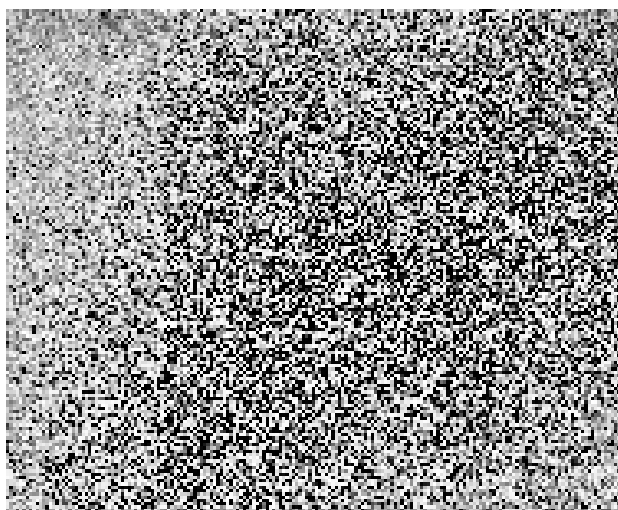
Мікроструктура металу ділянки перегріву складається з фериту і перліту з видманштеттової орієнтацією 3 бали шкали 4 по ГОСТ 5640-68 «Сталь. Металографічний метод оцінки мікроструктури листів і стрічки». Величина зерна відповідає 1-3 балом шкали по ГОСТ 5639-82 (рисунок 4.16).



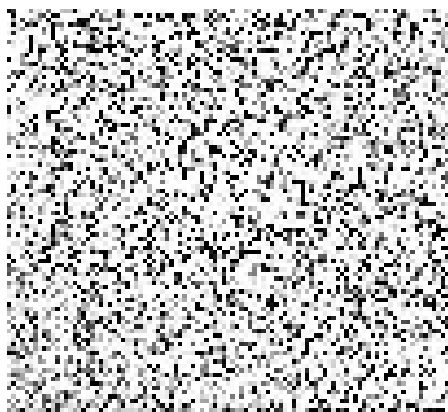
100<sup>x</sup>

Рисунок 4.16 - Фото мікроструктури металу ЗТВ (ділянка перегріву)

Мікроструктура металу ділянки перекристалізації (ділянка дрібного зерна) являє собою дрібнозернисту перекристалізовану ферито-перлітову структуру з видманштеттової орієнтацією 1 бали шкали 4 по ГОСТ 5640-68. Величина зерна відповідає 8-9 балом шкали по ГОСТ 5639-82 (рисунок 4.17).



а) 100<sup>x</sup>

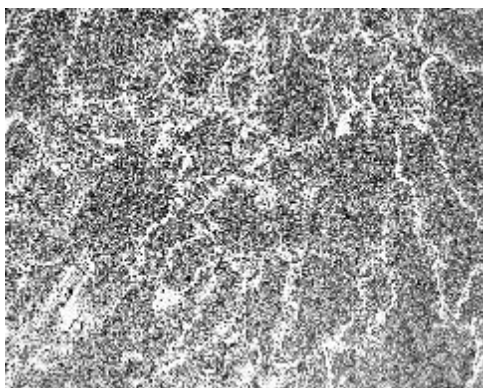


б) 500<sup>x</sup>

Рисунок 4.17 - Фото мікроструктури металу ЗТВ (ділянка перекристалізації, ділянка дрібного зерна)

#### **4.3.3 Мікроструктура зварного з'єднання, виконаного із застосуванням амплітудно-модульованого вібраційного впливу**

Мікроструктура металу зварного шва складається з сорбітообразного перліту (дрібногольчатого) з феритними облямівками і тонкими голками відманштетта, що відходять від феритної сітки всередину зерен. Величина зерна відповідає 1-4 балу шкали по ГОСТ 5639-82 " сталі і сплави. Методи виявлення та визначення величини зерна " (рисунок 4.18).

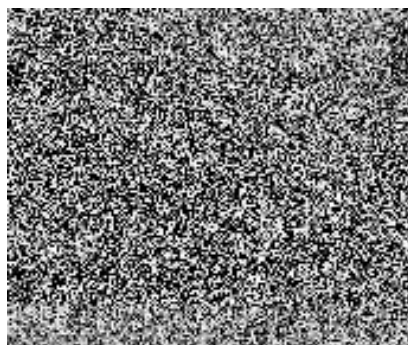


100<sup>x</sup>

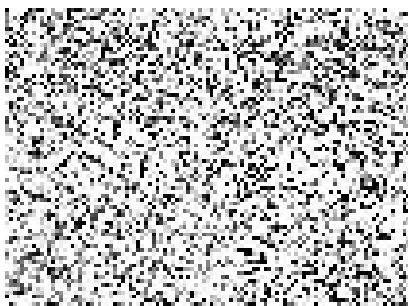
Рисунок 4.18 - Фото мікроструктури зварного шва

Мікроструктура металу ділянки перекристалізації (ділянка дрібного зерна) ЗТВ являє собою дрібнозернисту перекристалізовану ферито-перлітну

структуру. Величина зерна відповідає 10 балом шкали по ГОСТ 5639-82 (Рисунок 4.19).



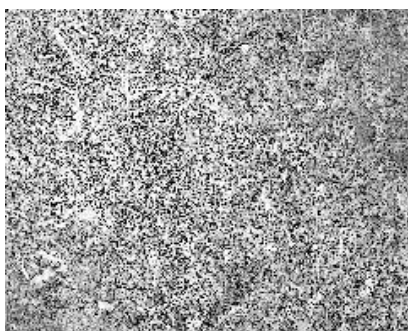
100<sup>x</sup>



500<sup>x</sup>

Рисунок 4.19 - Фото мікроструктури металу ЗТВ (ділянка перекристалізації, ділянка дрібного зерна)

Мікроструктура металу ділянки перегріву ЗТВ складається з фериту і перліту з видманштеттової орієнтацією 3 бали шкали 4 по ГОСТ 5640-68 «Сталь. Металографічний метод оцінки мікротруктури листів і стрічки». Величина зерна відповідає 2-4 балом шкали по ГОСТ 5639-82 (рисунок 4.20).

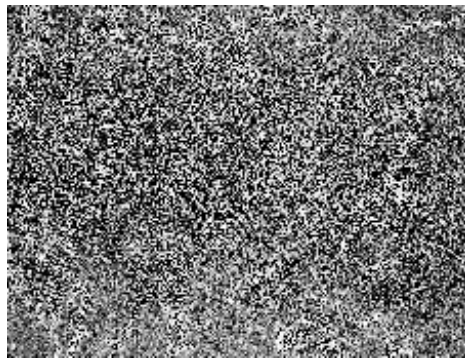


100<sup>x</sup>

Рисунок 4.20 - Фото мікроструктури металу ЗТВ (ділянка перегріву)

#### 4.3.4 Мікроструктура зварного з'єднання, виконаного із застосуванням частотно-модульованого вібраційного впливу

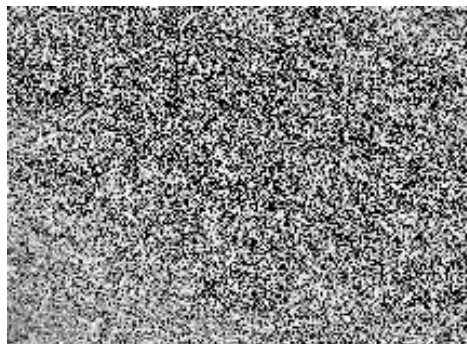
Мікроструктура металу зварного шва складається з сорбітообразного перліту (дрібногольчатого) з феритними облямівками і тонкими голками відманштетта, що відходять від феритної сітки всередину зерен. Величина зерна відповідає 1-4 балу шкали по ГОСТ 5639-82 " сталі і сплави. Методи виявлення та визначення величини зерна " (рисунок 4.21).



100<sup>x</sup>

Рисунок 4.21 - Фото мікроструктури зварного шва

Мікроструктура металу ділянки перекристалізації (ділянка дрібного зерна) ЗТВ являє собою дрібнозернисту перекристалізовану ферито-перлітну структуру. Величина зерна відповідає 10 балом шкали по ГОСТ 5639-82 (рисунок 4.22).



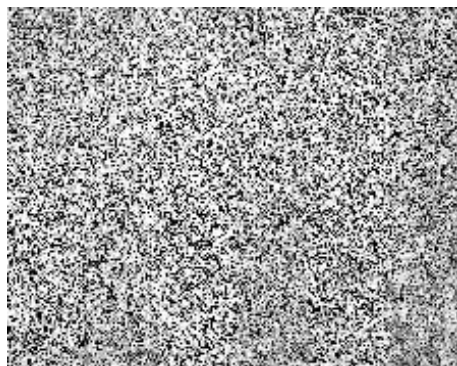
100<sup>x</sup>



500<sup>x</sup>

Рисунок 4.22 - Фото мікроструктура металу ЗТВ (ділянка перекристалізації, ділянка дрібного зерна)

Мікроструктура металла участка перегрева ЗТВ состоит из феррита и перлита с видманштеттовой ориентацией 3 балла шкалы 4 по ГОСТ 5640-68 «Сталь. Металлографический метод оценки микротруктуры листов и ленты». Величина зерна соответствует 3-4 баллу шкалы по ГОСТ 5639-82 (рисунок 4.23).



100<sup>x</sup>

Рисунок 4.23 - Фото мікроструктури металу ЗТВ (ділянка перегріву)

Дослідження мікроструктури зварних з'єднань показали, що розмір зерна зварного шва відповідає 1-4 бала незалежно від виду обробки.

Помітне дію вібраційного впливу спостерігається в ділянках перегріву, у яких розмір зерна при використанні вібраційного впливу знижується на 1-2 бали, а при використанні вібраційної обробки на амплітудно-модульованих і частотно-модульованих режимах до 2-3 балів. Також вібраційна обробка

дозволяє знизити розмір зерна на ділянках перекристалізації зони термічного впливу на 1-3 бали у порівнянні зі зварюванням без обробки. Пояснюється це явище руйнівною дією коливань і збільшенням швидкості охолодження в процесі віброобробки.

Дефектів структури металу при використанні вібраційного впливу не виявлено.

## **5 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ КОРПУСУ ФІЛЬТРА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВІБРАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ В ПРОЦЕСІ ЗВАРЮВАННЯ**

### **5.1 Аналіз полученных зависимостей и особенности процесса вибрационной обработки**

На основі робіт [49, 80-81, 118-119, 129-131] і отриманих експериментальних даних виявлено, що зниження зварювальних напруг і деформацій можливо з застосуванням вібраційної обробки в процесі зварювання. Режими вібраційної обробки, запропоновані різними дослідниками відрізняються, відрізняються також і технології зварювання, зварювані і зварювальні матеріали.

Вібраційний вплив може надати також і негативний вплив на метал зварного шва. При цьому єдиним параметром вібраційної обробки, який може призвести до погіршення якості зварного шва є амплітуда вібрації. У багатьох роботах зазначено, що амплітуда коливань в процесі зварювання не повинна перевищувати 1 мм. проведені нами дослідження також спостерігали появу прожога при різкому стрибку амплітуди. Вплив інших параметрів вібрації на зниження якості зварного шва відомі роботи не призводять.

Оптимальні режими вібрації на думку багатьох авторів різні, багато в чому це залежить і від швидкості кристалізації металу зварювальної ванни, від введеної теплової потужності і т. д. Чим швидше метал остигає, тим необхідна вища частота коливань. Основний частотний діапазон у відомих роботах укладається в інтервал від 30 до 250 Гц. У роботах Салміна А. Н. також вказується на ефективність так званої поличастотной вібраційної обробки, т. е. при накладенні коливань, від одного джерела. Такі накладення можуть виникати тільки при круговій вібрації, таким чином, роблячи її переважною перед лінійною.

Проведені нами порівняльні дослідження щодо застосування режимів вібраційного впливу із змінними параметрами (амплітудно-модульовані, частотно-модульовані) також показали свою ефективність.

Як показали дослідження, дані режими практично не поступаються вібраційної обробки, зварні з'єднання мають механічні властивості подібні до тих, що отримують після вібраційної обробки, а за рівнем зниження зварювальних напруг і деформацій дані сполуки навіть перевершують їх.

## **5.2 Розробка рекомендацій щодо удосконалення технологічного процесу виготовлення зварного корпусу фільтра**

Негативний вплив зварювальних деформацій на точність і якість виготовлення виявляється вже безпосередньо в процесі зварювання апарату:

- переміщення деталей створюють значні деформації в зоні зварювання і призводять до утворення гарячих тріщин;
- переміщення при зварюванні ускладнюють процес складання зварних деталей між собою і роблять його в особливих випадках практично неможливим без проведення додаткової правки;
- залишкові зварювальні напруження і деформації стають причиною виникнення холодних тріщин, які виникають безпосередньо після процесу зварювання;
- у процесі виготовлення, транспортування, монтажу та експлуатації зварних конструкцій з залишковими внутрішніми напруженнями відбуваються пластичні деформації, які додатково змінюють геометрію конструкцій і можуть значно знижувати ефективність роботи апаратів або привести до руйнування.

На основі проведених досліджень і отриманих експериментальних результатів, у дослідному варіанті, розроблена технологія зварювання із застосуванням вібраційного впливу на модульованих режимах, яка дає можливість отримувати зварні з'єднання з низьким рівнем залишкових зварювальних деформацій і напружень, отримано патент на винахід UA 2547066C1, 10.04.2015 Спосіб дугового зварювання металів [84].

З метою зниження овальності корпусу фільтра в процесі приварювання штуцерів був проведений експеримент з приварювання штуцерів з супутньою вібраційною обробкою на модульованому режимі.



Для створення вібраційного впливу використовували електричний вібратор марки ІВ-99Б-У2, технічні характеристики якого представлені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Характеристики електричного вібратора ІВ-99Б-У2

Характеристика	Значення
Потужність, кВт	0,5
Змушуюча сила, кН	0...3,4
Змушуюча сила, Гц	3...50
Напруга, В	380
Частота струму, Гц	3...50
Габарити ДхШхВ, мм	300×180×200
Маса, кг	12

Величину амплітуди вібрації регулювали за допомогою встановлених на вал вібратора ексцентриків. Для створення модульованих режимів вібратор підключали через тиристорний регулятор напруги. На малюнку 5.1 наведена електрична схема підключення.

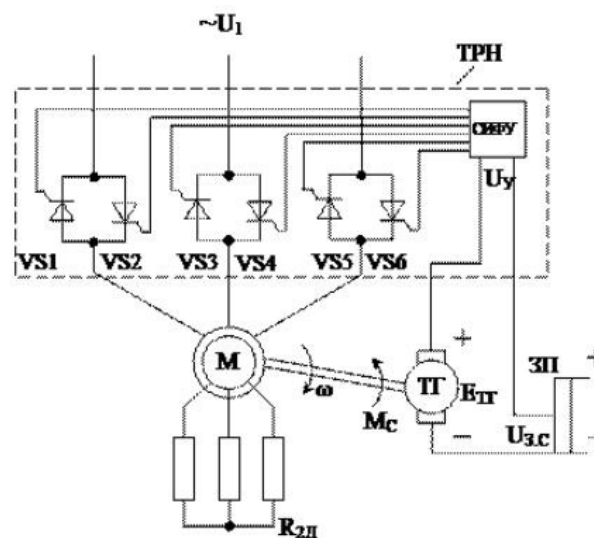
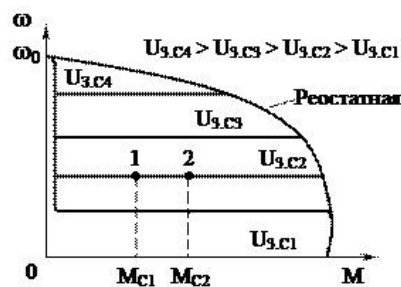


Рисунок 5.1 - Схема замкнутої системи регулювання швидкості тиристорний регулятор напруги – вібратор (ТРН - В)

Схема регулювання швидкості АТ з фазним ротором з використанням зворотного зв'язку по його швидкості (малюнок 5.1). Між мережею і статором вібратора включені три пари зустрічно-паралельно з'єднаних тиристорів VS1 – VS6, утворюють силову частину ТРН. Керуючі електроди тиристорів приєднані до виходів системи імпульсно-фазового управління (СІФУ), яка розподіляє керуючі імпульси на всі тиристори і здійснює їх зсув в залежності від сигналу керування  $U_U$ . До валу вібратора приєднаний тахогенератор ТГ. Його ЕРС ЕТГ порівнюється з задає напругою  $U_{3.3}$ , що знімається з задає потенціометра швидкості зп, причому ці напруги включені назустріч один одному. Різниця напруг  $U_{3.С}$  і ЕТГ, рівна напрузі управління надходить на вхід СІФУ.

При збільшенні цього сигналу кут керування тиристорами зменшується, а подається на вібратор напруга збільшується і навпаки. У ланцюг ротора вібратора постійно включений додатковий резистор R2Д, наявність якого дозволяє розширити діапазон регулювання швидкості і полегшити тепловий режим вібратора при його роботі на знижених швидкостях.

Робота вібратора при зміні моменту навантаження  $M_c$  на валу і постійному завданні швидкості сигналом  $U_{3.С2}$ . показана на малюнку 5.2. У вихідному положенні вібратор працював в точці 1 при моменті навантаження  $M_{C1}$ , а потім при збільшенні навантаження на валу вібратора його швидкість почне знижуватися, відповідно почне зменшуватися і ЕРС тахогенератора ЕТГ. Зменшення ЕТГ викликає згідно збільшення напруги управління, що призводить до зменшення кута відмикання тиристорів і збільшення тим самим подається на вібратор напруги.



б)

Рисунок 5.2 – Характеристики замкнутої системи ТРН-вібратор

Момент вібратора збільшується і в точці 2 зрівняється з МС2. Таким чином, збільшення моменту навантаження призвело до невеликого зниження швидкості вібратора, тобто, іншими словами, його характеристики стали жорсткими.

При зменшенні моменту навантаження Мс буде автоматично відбуватися зниження напруги на вібратор і тим самим підтримання його швидкості обертання на заданому рівні.

Змінюючи за допомогою потенціометра значення задає напруги UЗ.С., можна отримати ряд механічних характеристик електроприводу з відносно високою жорсткістю і необхідною перевантажувальною здатністю вібратора

Вібратор встановлювали на торець штуцера обробку проводили в процесі обварювання штуцера. Накладення прихваток виробляли без віброобробки.

Технологічні режими ведення процесу зварювання з вібрацією обрані відповідно до результатів вищеописаних експериментальних досліджень. Заміри параметрів вібрації з застосуванням вибротеста дали наступні результати: зміна амплітуди вібрації 164...412 мкм, частоти вібрації від 38 до 56 Гц.

Після обварювання штуцера були проведені виміри діаметрів уздовж корпусу фільтра і розрахована відносна овальність. Заміри були проведені за аналогічною методикою, описаною вище. Розташування максимального і мінімального діаметрів на досліджуваному корпусі не відрізнялося від попередніх обстежених корпусів.

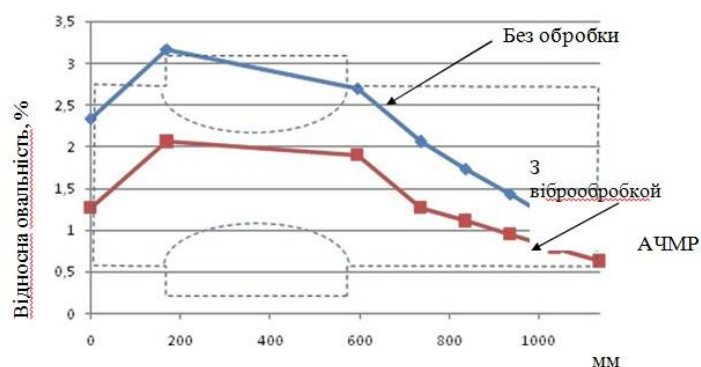


Рисунок 5.3 - зміна відносної овальності уздовж корпусу фільтра після складання і часткового обварювання штуцерів

Результати вимірів наведені на рисунку 5.3 в порівнянні зі значеннями відносної овальності корпусу фільтра на даній же стадії виготовляється без вібраційної обробки.

Результати заміру діаметрів показали, що овальність корпусу після приварювання патрубків із застосуванням супутньої вібраційної обробки значно знижується. Відносна овальність корпусу у вузлі з'єднання з кришкою фільтра знижується на 46%, що дозволить знизити трудомісткість складальних робіт, а також знизити рівень напружень у вузлі і відповідно ймовірність утворення тріщин.

Аналізуючи маршрут виготовлення фільтра, пропонується проводити вібраційну обробку в процесі приварки патрубків: на початковому етапі для зниження деформацій корпусу і на подальшому для зниження внутрішніх напруг, які можуть привести до виникнення тріщин (малюнок 5.4).

З урахуванням результатів попередніх досліджень Колеснікова Я. А., Салміна А. Н. і їх рекомендацій, а також конструктивного виконання фільтра, найбільш оптимальним місцем закріплення вібраційного пристрою представляється торцева поверхня патрубка. В такому випадку нам потрібен буде один вібратор, який буде ефективно впливати на все зварене з'єднання.



Рисунок 5.4 - Схема вдосконаленого маршруту виготовлення корпусу фільтра

## **6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ ПРОВЕДЕННІ НАУКОВО-ДОСЛІДНИХ РОБІТ**

Комбіноване витягування належить до формозмінюючих операцій холодного листового штампування.

Холодне штампування - це один з методів обробки металів тиском, при якому метал деформується пластично в холодному стані. Листове штампування застосовується для виготовлення деталей з листового матеріалу. Холодне штампування дозволяє значно скоротити витрати металу, так як метал не відділяється в стружку, зменшити трудомісткість виготовлення виробів і підвищити продуктивність праці. Одночасно холодна обробка тиском забезпечує зміцнення оброблюваного матеріалу, що дозволяє робити деталі більш легкими, менш металомісткими і більш зносостійкими. Листове холодне штампування здійснюється головним чином на механічних і гідравлічних пресах. З механічних пресів найбільше застосування знаходять кривошипні.

Все обладнання науково-дослідної лабораторії, в якій встановлено кривошипний прес повинно відповідати вимогам стандартів з безпеки на окремі групи виробничого обладнання. Зокрема преси повинні бути сконструйовані, виготовлені і налагоджені таким чином, щоб в разі можливої передбаченої відмови в роботі якого-небудь одного елемента - електричного, електронного, механічного, пневматичного або гідравлічного - не були порушені функції забезпечення безпеки або, в разі їх порушення, преси зупинялися [36].

Якщо конструкцією преса не можуть бути передбачені засоби захисту для забезпечення безпеки виконання робіт, профілактичного і поточного ремонту, переналагодження, то в експлуатаційній документації повинні бути вказані безпечні прийоми виконання цих робіт.

Кінематика преса заснована на передачі зусилля за допомогою повзуна, що здійснює зворотно-поступальний рух, що отримується в свою чергу від електроприводу за допомогою кривошипного, ексцентрикового, фрикційного або гвинтового механізму.

Для забезпечення безпеки в конструкції преса необхідно передбачити наступні запобіжні пристрої: муфта-гальмо фрикційного типу; врівноважувач, що виключає опускання повзуна під дією власної маси в разі обриву шатуна; огорожу міжштамповочного простору; виносні пульти управління; дворучне включення, що виключає перекриття кнопок механічним способом; огорожу, що не допускає випадкового натискання на педаль.

Міжштамповочний простір повинен мати місцеве освітлення з освітленістю не менше 50 лк [37].

Щоб уникнути травмування під час установки штампа необхідно відключити електропривід, вивісити на пусковому пристрої забороняючий плакат «Не включати - працюють люди» і переконатися в повній зупинці обертання маховика. Регулювати хід повзуна слід тільки в режимі «налагодження», користуючись кнопкою «налагодження», яка не має блокування контактів.

Необхідно пам'ятати, що неправильна установка штампа, неправильне регулювання ходу повзуна можуть привести до поломки штампа і травмування робітників. Тому вирубні штампи слід встановлювати в закритому положенні, а калібрувальні і штампи для гнуття - тільки з вкладеною в штамп заготовкою або деталлю.

Забезпечення безпеки залежить від конструкції штампів. При конструюванні штампа необхідно забезпечити неможливість доступу рук в зоні штампування між матрицею і пуансоном. У разі неможливості виконання цієї вимоги слід небезпечні зони захищати. У штампах з направляючими колонками необхідно виключити випадки сходу направляючих втулок при підйомі повзуна щоб уникнути травмування робочого через поломки колонки.

Кріплення матриць і пуансонів має бути надійним, що виключає їх зрив.

Найбільш небезпечною є операція ручного укладання заготовок або листа під пуансон і видалення готової деталі з матриці, оскільки руки робочого періодично знаходяться в зоні дії інструменту - штампа.

Поряд з автоматизацією і механізацією процесу штампування необхідно здійснювати і інші заходи безпеки, а саме:

- механізація подачі заготовок у штамп і видалення готових деталей з штампувального простору;
- розробка технологічних процесів із застосуванням безпечних конструкцій штампів;
- установка захисних пристосувань на пресах.

Застосування висувних штампів дозволяє робити укладання заготовки на матриці штампа поза зоною дії робочого інструмента. Однак конфігурація багатьох деталей не дозволяє застосовувати конструкції висувних і закритих штампів, і у більшості пресів штампи відкриті. На відкритих штампах для установки заготовки і поправки її на матриці для знімання відштампованих деталей застосовуються спеціальні пінцети.

Оскільки робітники не завжди користуються пінцетами, то для забезпечення безпеки на штампах відкритого типу застосовують додаткові заходи, як, наприклад, установка режиму роботи преса «одиначний хід з блокуванням рук». При цьому режимі роботи обидві руки робочого повинні бути зайняті під час робочого ходу повзуна. Розташування кнопок управління робиться таким, щоб виключалося натискання однією рукою обох кнопок. Застосування дворучного управління в повному обсязі виключає можливість травмування рук штампувальників в разі раптового ходу повзуна преса з різних причин несправності, більш ефективним засобом захисту рук є застосування нерухомих або рухомих огорожувальних пристроїв.

Нерухоме огороження постійно забезпечує закритим штамповий простір преса протягом усього робочого циклу повзуна. Для того щоб грати не заважала робітникам, його встановлюють нижче площини роз'єму штампа. При опусканні повзуна захисна решітка піднімається вгору на відстань не менше ходу повзуна. Якщо при опусканні повзуна руки працюючого знаходяться в небезпечній зоні, то рухома решітка відводить їх вгору, тим самим виключаючи небезпеку травмування.

Небезпека порізів рук виникає при ручному перенесенні листових матеріалів і заготовок гострими крайками сталевого листа і при наявності задирок, які утворюються при поганому заточенню штампів.

### **6.1 Загальні вимоги охорони праці**

Студенти, що беруть участь в НДР, допускаються до виконання робіт лише в присутності і під безпосереднім керівництвом викладача, що веде НДРС.

Забороняється працювати в лабораторії в нетверезому стані, вживати алкогольні напої, наркотичні і токсичні речовини під час роботи і після закінчення роботи на території університету [36 – 39].

Спецодяг і інші засоби індивідуального захисту повинні зберігатися в спеціально відведеному місці. Забороняється перебувати в лабораторії у верхньому одязі і класти одяг на випробувальні установки, прилади і устаткування.

При роботі в лабораторії необхідно дотримувати правила особистої гігієни. Забороняється приймати їжу на робочому місці.

У лабораторії має бути аптечка для надання першої допомоги при порізі, опіку і інших нещасних випадках [38].

Для гасіння можливих займань і пожеж лабораторія має бути оснащена необхідними засобами пожежегасіння (вогнегасник, ящик з піском).

До самостійної роботи в якості штампувальника допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли медичний огляд, а також [39]:

- вступний інструктаж;
- інструктаж з пожежної безпеки;
- первинний інструктаж на робочому місці;
- навчання безпечним методам і прийомам праці не менше ніж за 10 годинною програмою;
- інструктаж з електробезпеки на робочому місці і перевірку засвоєння його змісту.



Основними небезпечними і шкідливими виробничими факторами при роботі на пресі холодного штампування при певних обставинах можуть бути [38]:

- елементи виробничого обладнання;
- несправний робочий інструмент;
- частки металу, що відлітають;
- електрострум;
- промисловий пил;
- виробничий шум;
- механічні небезпеки: розчавлювання, защемлення і падіння; відрізання; розрив, затягування, потрапляння під удар.

При виявленні несправностей устаткування, блокувань, пристроїв, інструментів та інші недоліки або небезпеки на робочому місці негайно повідомити викладачу. Приступити до роботи можна тільки з його дозволу після усунення всіх недоліків.

При виявленні загоряння або у випадку пожежі [39]:

- відключити обладнання;
- повідомити в пожежну охорону і адміністрації;
- приступити до гасіння пожежі наявними в цеху первинними засобами пожежогасіння відповідно до інструкції з пожежної безпеки.

При загрозі життю - покинути приміщення.

При нещасному випадку надати потерпілому першу (долікарську) допомогу, негайно повідомити про те, що трапилося викладачу, вжити заходів до збереження обстановки події (стан устаткування), якщо це не створює небезпеки для оточуючих.

## **6.2 Вимоги охорони праці перед початком роботи**

Перед початком роботи мають бути перевірені з'єднання обладнання з контуром захисного заземлення, справність електроприладів, інструменту,

автоматичних вимикачів, розеток, вилок, освітлення, а також наявність первинних засобів пожежегасіння [36 – 39].

Заземлюючі контакти розеток мають бути надійно з'єднані з контуром захисного заземлення.

Перед початком роботи переконатися в тому, що всі електроприлади, використовувані в експерименті, правильно підключені і надійно заземлені.

При експлуатації електроприладів необхідно керуватися правилами, викладеними в технічному паспорті.

При виявленні несправностей електроприладів, стендів, захисного заземлення повідомити про це науковому керівникові лабораторії, або зав. лабораторією.

Робота на пресах повинна проводитися тільки після перевірки [39]:

- справності штампів і відповідності їх розмірних модельних характеристик;
- наявності та справності навколо обертових частин пресів захисних огорожень, заземлюючих пристроїв, електропроводки;
- наявності і справності блокувальних і запобіжних пристроїв, зблокованих з пусковими механізмами.

Всі рухи (переміщення) преса, які можуть стати причиною небезпеки для обслуговуючого персоналу та оточуючих, повинні мати справне захисне блокування. Блокуючі пристрої преса при його роботі в одному з режимів повинні виключити можливість його роботи в іншому режимі і мимовільне перемикання з режиму на режим. З метою забезпечення безпеки штампувальника система управління пресом повинна мати пристрій аварійної зупинки, яке спрацьовує при будь-якому порушенні працездатності преса незалежно від режиму його роботи, в тому числі при взаємному відключенні будь-якого виду живлення, яке використовується в обслуговуваному обладнанні.

Органи аварійного відключення повинні оснащуватися механічними засувками для фіксації їх у положенні "Виключено". Повторне включення преса

має бути можливим тільки після того, як всі органи аварійного відключення, які раніше були задіяні, будуть вручну наведені в початкове положення. Повернення у вихідне положення органів аварійного відключення не повинно викликати повторного включення будь-якої частини преса.

Робота на пресах повинна проводитися після перевірки:

- справності роботи приладів системи управління, наявності та рівня мастила в резервуарі;
- відсутність течії масла;
- дії аварійно-попереджувальної сигналізації на сигнальному табло (червона лампочка - небезпеки);
- справності роботи фотозахисту;
- наявності тиску і відповідності його зусилля.

### **6.3 Вимоги охорони праці під час роботи**

Дозволяється працювати лише зі справними електроприладами.

При роботі з електроприладами можливі випадки ураження людей електричним струмом. Причинами цього можуть бути [38, 39]:

- одночасний дотик руками або металевим предметом до корпусу електроприладів і оголених проводів;
- робота з несправними електроприладами;
- порушення правил користування електроприладами.

Забороняється працювати з електроприладами і вимірювальними приладами при знятому кожусі.

Забороняється висмикувати штепсельні роз'єми, вилки і фішки, узявшись за провід. Відключення проводити тільки узявшись за роз'єм, вилку або фішку, щоб уникнути короткого замикання і можливого при цьому нещасного випадку (опіку).

Забороняється працювати з електроприладами у вогкому одязі, вогкими руками, перекривати вентиляційні отвори, якщо вони є на приладах.

Куріння в лабораторії заборонене.

Забороняється залишати без спостереження, ремонтувати і переносити включені в мережу електроприлади.

Забороняється підключати декілька споживачів електроенергії до однієї штепсельної розетки.

Забороняється заміна згорілих запобіжників «жучками». Необхідно застосовувати запобіжники заводського виготовлення, що калібруються.

Забороняється захарашувати підступи до електричних пристроїв (шафам, автоматичним вимикачам, розеткам), а також відчиняти їх.

При раптовому припиненні подачі електроенергії всі вимикачі і рубильники мають бути негайно вимкнені.

Не допускається залишати неізованими оголені проводи, перевантажувати електромережу, користуватися розбитими вилками, розетками і вимикачами.

Електроприлади мають бути розташовані на відстані не менше 1 м від нагрівальних приладів і не повинні піддаватися дії прямих сонячних променів.

Робоче місце утримувати в сухому і чистому стані, не допускати запиленості електроприладів, вимірювальних приладів, стендів.

Забороняється виконувати очистку від пилу і бруду включених в мережу 220V електроприладів, вимірювальних приладів, стендів.

При виявленні несправностей електроприладів, вимірювальних приладів, стендів, за відсутності їх заземлення, а також при появі іскріння або характерного запаху перегрітої ізоляції, негайно знеструмити їх. Повідомити про це науковому керівникові лабораторії або його заступникові.

Приступати до роботи дозволяється тільки після усунення помічених несправностей електроприладів, вимірювальних приладів і стендів.

При проведенні профілактичних і ремонтних робіт дозволяється використовувати ізопропиловий або етиловий спирт.

Дозволяється зберігати запас легкозаймистих рідин, що не перевищує 0,5 літра. Зберігання запасу дозволяється в тарі, що не згоряє, зі щільно закритою кришкою.

Забороняється виконувати ремонтні роботи, пов'язані з обслуговуванням преса, без відключення системи живлення. Обов'язковою є присутність другої особи, яка наглядає за безпекою виробництва робіт, в разі навчання і (або) налагодження з використанням переносного дистанційного пульта управління.

Оброблені та необроблені деталі повинні складатися тільки на відведених для цієї мети місцях так, щоб вони не захарашували робочого місця.

Для дрібних деталей, заготовок і відходів повинна бути передбачена спеціальна тара.

Для зберігання інструменту, невеликих, часто використовуваних пристроїв і оснащення, робочі місця повинні бути обладнані шафами, стелажми тощо.

Для екстреної зупинки обладнання повинно оснащуватися кнопками «Стоп» червоного кольору з грибоподібним штовхачем, що знаходяться в легкодоступних місцях, в зоні постійних робочих приміщеннях поруч з небезпечними вузлами, що часто обслуговуються.

#### **6.4 Вимоги охорони праці після закінчення роботи**

Після закінчення роботи вимкнути електроприлади, вимірювальні прилади, стенди.

Вимкнути всі автоматичні вимикачі, відключити використовувані подовжувачі мережі 220 V.

Привести до ладу робоче місце, прибравши пил, що з'явився, і сміття. Інструменти, пристосування та мастильні матеріали прибрати у відведене для них місце. Ганчір'я і займисті матеріали, щоб уникнути самозаймання, прибрати в металеві ящики з щільними кришками.

Зняти спецодяг, прибрати його в шафу, вимити руки та обличчя з милом.

При виході з приміщення лабораторії необхідно вимкнути всі споживачі електроенергії.

При виявлених під час роботи і після закінчення роботи несправностях і неполадках електроприладів повідомити наукового керівника лабораторії або його заступника.

## 6.5 Вимоги охорони праці в аварійних ситуаціях

При ліквідації аварійної ситуації необхідно діяти відповідно до плану ліквідації аварій [37].

При роботі з електроприладами і вимірювальними приладами в лабораторії можливі наступні аварійні ситуації:

- загоряння горючих матеріалів;
- ураження електричним струмом.

Джерелами спалаху в лабораторії можуть бути вузли приладів, пристроїв електроживлення, де в наслідок різних порушень перегріваються електронні компоненти схем, проводи, утворюються електричні іскри і дуги, здатні спричинити загоряння горючих матеріалів.

Співробітники і викладачі, що користуються електроприладами в лабораторії, зобов'язані знати розташування засобів пожежогасіння і уміти ними користуватися.

При пожежі [37, 38]:

- негайно знеструмити всі електроприлади загальним автоматичним вимикачем;
- негайно евакуювати в безпечне місце людей що були ушкоджені;
- повідомити за телефоном 101 в пожежну команду;
- видалити в безпечне місце неушкоджені електроприлади;
- приступити до гасіння пожежі первинними засобами пожежогасіння;
- повідомити керівництво університету про те, що сталося;
- електроприлади гасити вуглекислотними вогнегасниками, порошковими вогнегасниками або сухим піском;
- гасити електроприлади і дроти водою забороняється.

В разі ураження електричним струмом слід негайно знеструмити електроприлади і викликати швидку допомогу по телефону 103. Співробітники, що працюють в лабораторії, зобов'язані знати заходи надання першої допомоги

людині, яка була ушкоджена при ураженні електричним струмом і уміти надати їй при необхідності.

Негайно повідомити про нещасний випадок керівництво лабораторії, декана факультету.

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

На підставі проведених досліджень та отриманих результатів були зроблені наступні висновки:

1. Експериментально встановлено, що значні відхилення форми поперечних перерізів корпусів спостерігаються поблизу установки штуцерів. В зварних корпусах, виготовлених із сталі 09Г2С, що мають поблизу торця ввариваемый патрубок, в інтервалі співвідношення діаметрів штуцера і обичайки від 0,1 до 0,7 збільшення відносної овальності після приварки з високим ступенем достовірності описується логарифмічною функцією  $a = 1,12 \ln(d/D) + 2,8$ .

2. При проведенні рентгеноструктурного аналізу зразків встановлено, що вібраційна обробка дозволяє знизити рівень внутрішніх мікронапружень в зварному шві на 9...17%, при цьому максимальне зниження напруг виявлено при використанні амплітудно-модульованих режимів. Вібраційна обробка дозволяє знизити розмір зерна на ділянках перекристалізації зони термічного впливу на 1-3 бали у порівнянні зі зварюванням без обробки.

3. Вперше встановлено, що модульовані коливання з несучою частотою 50 Гц зі значенням амплітуди вібропереміщення від 164 до 412 мкм дозволяють знизити відхилення корпусу поблизу штуцера після його приварки на 46%.

4. Розроблений спосіб дугового зварювання із застосуванням вібраційної обробки на модульованих режимах (пат. № 2547066, опубл. 10.04.2015), на основі якого розроблена і впроваджена у виробництво технологія виготовлення зварних корпусів вертикальних фільтрів із сталі 09Г2С.



## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Абдєєв, Р. Г. вплив технології виготовлення на точність перетинів корпусів нафтохімічної апаратури / Р. Г. Абдєєв, Р. Г. Різванов, А. М. Файрушин // III Конгрес нафтогазопромисловців Росії. Секція Н» про-блеми нафти і газу", Уфа, 23-25 травня 2001 р.: Наукові праці. – Уфа.: Реактив, 2001. – С. 331-332.
2. Абрамов, В. В. залишкові напруги і деформації в металах. Розрахунки методом розчленування тіла / В. В. Абрамов. –М.: Машгіз, 1963. – 352 с.
3. Абрамов, О. В. Кристалізація металу в ультрозвуковом полі/ О. В. Абрамов. – М.: Металургія, 1972. – 256 с.
4. Автоматизація процесу зварювання кільцевих швів нафтохімічних апаратів / Н. Р. Абдєєв, Р. Р. Різванов, А. М. Файрушин, А. Р. Абдюков // Транспортування нафти і газу. (Технічна діагностика і ресурс): Збірник матеріалів конгресу нафтопромисловців РФ. – Уфа, 2000. – С. 106-110.
5. Анкірський, Б. М. вплив вібраційної і термічної обробки на механічні властивості металу зварного з'єднання сталі 20К // Зварювальне виробництво. - 1985. – № 3. – С. 19 – 21.
6. Апальков, А. А. Метод вимірювання залишкових напруг в масивних елементах конструкцій з використанням електронної спекл- інтерферометрії / Апальков А. А., Одинцев І. м., Розумовський І. А. // Заводська лабораторія. Діагностика матеріалів. – 2003. – №2. – С. 45-49.
7. Ачинович, Н.Н Вплив залишкових напружень на стійкість зварних з'єднань сталі підвищеної міцності / Н.Н. Ачинович, Н.А. Іклів // Автоматичне зварювання. – 1973. – № 11. - С. 6-8.
8. Баскаков С. І. Радіотехнічні ланцюги і сигнали: Підручник. – М: Вища школа, 1983. - 536 с.
9. Бакієв, А. В. Технологія апаратобудування / А. В. Бакієв. – Уфа: УГНТУ, 1995. -297 с.

10. Бакши, О. А. Про зняття зварювальних напружень в зварних з'єднаннях з механічною неоднорідністю додатком зовнішнього навантаження / О. А. Бакши, Р. С. Зайнуллин // Зварювальне виробництво. – 1973. – № 7. – С. 10 – 11.

11. Бакши, О. А. Вплив залишкових напружень на стійкість зварних з'єднань з м'яким прошарком при згині з крученням / О. А. Бакши, Н.А. Іклів, А. Л. Решетов // Автоматичне зварювання. – 1978. – № 1. – С. 31 – 33.

12. Берлінер, Ю. І. технологія хімічної та нафтової апарато-будови / Ю. І. Берлінер, Ю. А. Балашов. – М: Машинобудування, 1976. – 256 с.

13. Біргер, І. А. залишкові напруги / І. А. Біргер. – М.: Машгіз, 1963. – 232 с.

14. У цьому випадку, як і раніше, ми не знаємо, що це таке, як і раніше. – М.: Металургія, 1972. – 304 с.

15. Бубнов, В. А. Підвищення точності і несучої здатності базових деталей хімічних машин і апаратів методами пластичного деформування: дис. доктора технічних наук: 05.02.13 / Бубнов Віктор Олександрович. – Курган, 1989. – 415 с.

16. Бубнов, В. А. Підвищення несучої здатності кільцевих елементів холодним пластичним деформуванням. / В. А. Бубнов, В. А. Вотінов // Опір втоми і підвищення несучої здатності виробів методом поверхневої пластичної деформації: Тез. докл. Науково-технічної конференції. – Перм, 1988. - С. 44-45.

17. Бубнов, В. А. Зниження залишкових напружень деформаційним методом / В. А. Бубнов, в. І. Макаров; Курганський машинобудівний інститут. – Курган, 1988. – 198 с.–Деп. у ЦИНТИХімнефтемаш.

18. Вібрації в техніці: в 6 т. Т. 1/ під ред. Ст. Н. Челомей. – М: Машинобудування, 1978. – 352 с.

19. Вібрації в техніці: в 6 т. Т. 3/ під ред. Ст. Н. Челомей. – М: Машинобудування, 1980. – 544 с.

20. Вібрації в техніці: в 6 т. Т. 6 / під ред. Ст. Н. Челомей. – М: Машинобудування, 1981. – 456 с.

21. Вібраційна обробка металевих деталей / Е. А. Соловйова, А. Ф. Петров, О. Г. Чікаліді, А. М. Кім-Хенкіна // хімічне і нафтове машинобудування. – 1991. – №1. – С. 31 – 32.
22. Винокуров, В. а. відпустка зварювальних конструкцій для зниження напруг / В. А. Винокуров. – М: Машинобудування, 1973. – 213 с.
23. Винокуров, В. А. Зварювальні деформації і напруги / В. А. Ві-нокуров. – М: Машинобудування, 1968. – 236 с.
24. Винокуров, В. А. Вплив пластичних деформацій і залишкових напружень на стійкість сталей руйнувань при знижених температурах / В. А. Винокуров, М. Н. Скуріхін // Автоматичне зварювання. – 1967. – № 4. - С. 1-5.
25. Віхман, Г. Л. Основи конструювання апаратів і машин нафтопереробних заводів / Г. Л. Віхман, С. А. Круглов. – М.: Гостоптехиздат, 1962. – 350 с.
26. Вплив віброобробки на напружений стан зварних кон-струкцій / В. А. Іонов, В. І. Борисов, А. М. Вельбель, В. Г. Смирнов // Зварювальне виробництво. – 1997. – № 9. – С. 26 – 29.
27. Вплив залишкових напруг на опір зварних з'єднань руйнування при циклічному стисненні / Е. К. Добикіна, А. Г. Буренко, П. П. Міхеев, Ю. Ф. Кудрявцев // Автоматичне зварювання. – 1992. – № 2. – С. 11– 14.
28. Вплив залишкових напружень на траєкторію і швидкість поширення тріщини при циклическомнагруженні зварних з'єднань / Г. П. Карзов, В. А. Кархин, В. П. Леонов, Б. З. Марголін // Автоматичне зварювання. – 1986. – № 3. – С. 5-10, 14.
29. Вотінов Ст. А. Ресурсозберігаюча технологія виготовлення рото-рів промислових центрифуг на основі підвищення точності складальних елементів: дис. кандидата технічних наук: 05.02.13 / Вотінов Валерій Алексан-дрович. – Курган, 2000. – 159 с.

30. Гадалов, Ст. Н. Вплив віброобробки на мікротвердість та опір втоми конструкційних сталей / В. Н. Гадалов та ін. // Заготівельні виробництва в машинобудуванні. -2011. –№ 12. –С. 36–38.

31. Галяш, А. А. Визначення частоти навантаження при низькочастотної віброобробки зварних конструкцій / А. А. Галяш, К. І. Васильченко, Р. П. Чернецов // Зварювальне виробництво. – 1992. – №8.– С. 35 – 36.

32. Гевлич, С. О. Дослідження релаксації залишкових напружень в зварних з'єднаннях із сталі 09Г2С зі сталлю 20ГМЛ після віброобробки / С. О. Гевлич, Ст. Н. Князев // Хімічне і нафтове машинобудування. – 1986. – № 8. – С. 8– 9.

33. Гіренко, В. С. аналіз впливу залишкових напруг на міцність зварних з'єднань / В. С. Гіренко, В. І. Кір'ян // Автоматичне зварювання. -1975. – № 12. – С. 1-5.

34. Григорьянц, а. Г. технології низькочастотної віброобробки зварних конструкцій в машинобудуванні / А. Г. Григорьянц і ін. // Зварювальне виробництво. -2014. –№ 6. –С. 19-23.

35. Григорьянц, а. Г. нові технології низькочастотної віброобробки виробів в машинобудуванні / А. Г. Григорьянц та ін. // технологія машинобудови. -2014. – № 3. –С. 43-47.

36. Даусон, Р. вібраційне зняття напруг і дослідження його ефективності / Р. Даусон, Д. Г. Моффат // праці американського товариства інженерів механіків. – 1980 р. – № 2. – С. 1-9.

37. Дєєв, Г. Ф. дефекти зварних швів / Г. Ф. Дєєв, І. Р. Пацкевич. – Київ: Наук. думка, 1984. – 208 с.

38. Дрига, А. І. вібраційна обробка зварного корпусу кінцевої частини турбогенератора для зниження залишкових напруг // Автоматичне зварювання. – 1990. – № 6. – С. 10 -11.

39. Дрига, А. В. Виброкомплекс ВК–86 для стабілізуючої обробки великих зварних конструкцій // Зварювальне виробництво. – 1989. – № 3. – С. 28-30.

40. Єфімов, В. а. фізичні методи впливу на процеси затвердіння сплавів/ В. А. Єфімов, А. С. Ельдарханов. – М: Металургія, 1995 – 272 с.

41. Ємельянов, Р. Т. Вібраційна обробка зварних конструкцій / Р. Т. Ємельянов та ін// Вісник Красноярського державного аграрного університету. 2014. № 4. С. 239-241.
42. Заріпов, М. З. Модернізація технології виготовлення зварних апаратів зі сталі 12Х18Н10Т з застосуванням вібраційної обробки: дис. канд. техн. наук: 05.02.13 / Заріпов Марс Зульфатович – Уфа, 2010. – 124 с.
43. Зимницький Ю. А. Експериментальна перевірка впливу низькочастотної віброобробки на експлуатаційну надійність корпусних конструкцій / Ю. А. Зимницький, Ст. Н.Хвалинській // Суднобудування. -2004. –№ 1. –С. 50-52.
44. Ігнат'єва, В. С. вплив залишкових напружень на розвиток уста-лостной тріщини в області зварного стикового шва / В. С. Ігнат'єва, Р. Р. Ку-лахмет'єв, В. В. Ларіонова // Автоматичне зварювання. – 1985. – № 1. - С. 1-4.
45. Казимиров, а. А. механізм зменшення залишкових напружень при імпульсній обробці зварних з'єднань / А. А. Казимиров, В. П. Мор-гун, В. Ф. Хоменко // Автоматичне зварювання. – 1974. – № 7. – С. 39 – 43.
46. Карпенко, а. С. залишкові деформації циліндричної обичайки при зварюванні поздовжніх швів / А. С. Карпенко, І. М. Чертов, А. Є. Бабенко // Автоматичне зварювання. – 1985. – № 8. – С. 49 – 52.
47. Карзов, Р. П. Розрахункове визначення полів залишкових зварювальних напружень в конструкціях оболонкового типу (Повідомлення 1) / Г. П. Карзов, В. П. Леонов, Б. З. Марголін // Автоматичне зварювання. – 1992. – № 3. – С. 3-12.
48. Карзов, Р. П. Розрахункове визначення полів залишкових зварювальних напружень в конструкціях оболонкового типу (Повідомлення 2) / Г. П. Карзов, В. П. Леонов, Б. З. Марголін // Автоматичне зварювання. – 1992. – № 4. – С. 7-12.
12. Карпов, а. Л. вдосконалення технології виготовлення конструктивних елементів апаратів зі сталі 09Г2С із застосуванням локальної віброобробки: дис. канд. техн. наук: 05.02.13 / Карпов Анатолій Львович – Уфа, 2007. – 117 с.

50. Каретніков, Д. В. вдосконалення технології виготовлення зварних корпусів апаратів зі сталі 09Г2С: дис. канд. техн. наук: 05.02.13 / Каретніков Денис Володимирович-Уфа, 2012. – 114 с.

51. Колесніков, Я. А. Удосконалення технології виготовлення зварного обладнання нафтопереробної промисловості з жаро-міцних сталей типу 15Х5М: дис. канд. техн. наук: 05.02.13 / Колесніков Яків Олександрович – Уфа, 2006. – 110 с.

52. Коваленко, В. С. Металографічні реактиви. Довідник. 3-е изд., перероб. та доп. — М.: Металургія, 1981р. - 120 с.

53. Кудрявцев, Ю. Ф. вплив залишкових напруг на довговічність зварних з'єднань // Автоматичне зварювання. – 1990. – № 1. – С. 5-8.

54. Латипов, А. А. Вплив режимів вібраційної обробки в процесі зварювання на напружено-деформований стан зварної конструкції / Нові технології-нафтогазовому регіону: Матеріали Всеросійської научно-практичної конференції. Т. 2; - Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. – С. 130-131.

55. Арсен Мірзоян-Зимовий Пляж Металознавство зварювання і термічна обробка зварних з'єднань / Л. С. Лівшиць, А. н. Хакімов. – 2-е вид., перероблений і дод. - М.: Машинобудування, 1989. – 336 с.

56. Лобанов, Л. М. розрахунково-експериментальний метод визначення залишкових зварювальних поздовжніх напруг в листових конструкціях / Л. М. Лобанов, В. І. Павловський, О. В. Махненко // Автоматичне зварювання. – 1993. – № 1. – С. 21 – 24.

57. Лисов, М. І. Теорія і розрахунок процесів виготовлення деталей методами гнуття / М. І. Лисов. – М: Машинобудування, 1966. – 236 с.

58. Мазур, В. К. Застосування вібраційної обробки при вигонді маложестких валів. Тольяттинська ТЕЦ. Матеріали науково-технічної конференції «Високі технології в машинобудуванні». – Самара, 2002 р. – 200 с.

59. Макаров, Р. А. Тензометрія в машинобудуванні / Р. А. Макаров. – М: Машинобудування, 1975. – 286 с.

60. Малінін, Н. Н. Прикладна теорія пластичності і повзучості / Н.Н. Малінін. – М: Машинобудування, 1968. – 362 с.
61. Манохін, Ю. І. Оцінка впливу циклічного навантаження внут-реннім тиском на точність форми зварних порожнистих циліндрів / Ю. І. Мано-хін, А. В. Сорокін, М. А. Всяких // Зварювальне виробництво. – 1987. – №12. – С. 14.
62. Математична статистика: підручник / В. М. Іванова, Ст. Н. Калин-кіна, Л. А. Нещумова та ін – М: Вища школа, 1981. – 371 с.
63. Махненко, в. І. Розрахунковий метод оцінки напружень і деформацій в зоні поздовжніх зварних швів циліндричних оболонок / в. І. Мах-ненко, Л. А. Єгорова // Автоматичне зварювання. – 1980. – № 3. – С. 3 – 7.
64. Махненко, В. І. вплив залишкових зварювальних напруг на граничне навантаження і розрахункові розміри несучих кутових швів різних з'єднань / В. І. Махненко, Т. Г. Рябчук // Автоматичне зварювання. – 1993. - № 3. – С. 3-7.
65. Махненко, в. І. Особливості розподілу напружень і деформацій від зварювання кільцевих швів у циліндричних оболонках / в. І. Махнен-ко, В. М. Шекера, Л. А. Избенко// Автоматичне зварювання. – 1970. – № 12. - С. 43 – 47.
66. Медведєв, С. В. Комп'ютерне моделювання залишкових зварювальних деформацій при технологічному проектуванні зварних конструкцій // Зварювальне виробництво. – 2001. – № 8. – С. 10 – 18.
67. Навроцький, Д. І. про вплив залишкових напруг на вібраційну міцність зразків з поперечними зварними швами / Д. І. Навроцький, В. н. Савельєв / / Зварювальне виробництво. – 1960. – № 5. – С. 15 – 17.
68. Назаров, м. В., теорія передачі сигналів / А. Г. Зюко, Д. Д. Клов-ський, М. В. Назаров, Л. М. Фінк. - М: Радіо і зв'язок, 1986.— 304 с.
69. Нерівний, В. М. Теорія зварювальних процесів. М.: Видавництво МГТУ ім. Н. Е. Баумана, 2007. – 752 с.
70. Никифоров, А. Д. Основи взаємозамінності в хімічному апаратостроєнні. – М: Машинобудування, 1979. – 157 с.

71. Миколаїв, Г. А. зварні конструкції. Міцність зварних з'єднань і деформації конструкцій / Г. А. Миколаїв, С. А. Куркін, В. А. Виноку-Рів.– М: Вища школа, 1982. – 272с.

72. Нікольс, Р. В. конструювання і технологія виготовлення судин тиску. Пер. з англ. – М: Машинобудування, 1975. – 464 с.

73. Носкова, Н. І. Релаксація залишкових напруг металів в полі пружних коливань / н. І. Носкова, Н. Ф. Вільфанова // проблеми міцності. – 1986.  
– №9. – С. 67 – 71.

74. Забезпечення якості виготовлення кільцевих зварних з'єднань нафтохімічної апаратури / Н. Р. Абдеев, Р. Р. Різванов, А. М. Файрушин та ін. // Тези доповідей ювілейної 20-ї науково-технічної конференції зварників Уралу. – Нижній Тагіл, 2001. – С. 86 – 87.

75. Одінг, В. А. Допустимі напруги в машиностроєнні і циклічна міцність металів / В. А. Одінг. – М.: Машгіз, 1962. – 260 с.

76. Окерблом, Н. О. Розрахунок деформацій металоконструкцій при зварюванні / Н. О. Окерблом. – Л.: Машгіз, 1955. – 212 с.

77. Окерблом, Н. О. Вплив залишкових напруг на вібраційну міцність зварних конструкцій / н. О. Арсен Мірзоян-Зимовий Пляж Навроцький // Зварювальне виробництво. – 1960. – № 3. – С. 9 – 12.

78. Олійник, Н. В. Несуча здатність елементів конструкцій при циклічній нарузі / н. В. Олійник. – Києва.: Наукова думка, 1985. – 238 с.

79. Опара, В. С. Електрогідроімпульсна обробка багатошовних зварних вузлів / В. С. Опара, Є. С. Юрченко, Л. Ю. Демиденко // Автоматичне зварювання. – 1990. – № 6. – С. 9 -10.

80. Патент на винахід RU № 2424885 С1 27.07.2011 спосіб застосування залишкових напруг у зварних з'єднаннях металів / Файрушін А. М., Заріпов М. З., Каретніков Д. В., Ахтямов Р. М., Абдуллін Т. З., Фазілов М. Р.

81. Патент на винахід RU № 2477202 С1 від 10.03.2013 спосіб зняття залишкових напруг в кільцевих зварних з'єднаннях металів при зварюванні під



флюсом і пристрій його реалізації / Каретніков Д. В., Різванов Р. Г., Ібрагімов І. Г., Файрушін А. М., Колохов К. С.

82. Патент на винахід RU 2259406 12.03.2004 пристрій для локальної вібраційної обробки зварних швів / Пановко Г. Я., Волоховська О. А., Сахвадзе Г. Ж., Сиромятніков В. Ф., Шохін А. Є., Акінфієв Т. С., Ма-нуель А., Кочетов О. С.

83. Пат. 19539 Японія, кл. 12С311, МКІ (В21). Спосіб зняття залишкових напруг енергією вибуху / С. Такенао, К. Тосікадзу // винаходи за кордоном. – 1983. – №3.

84. Патент на винахід RU 2547066С1, 10.04.2015 спосіб дугового зварювання металів / Латипов А. А., Файрушін А. М., Каретніков Д. В., Хафізова О. Ф., Ібрагімов І. Г., Колесніков Я. А.

85. Петушков, В. Г. Механіка перерозподілу залишкових напружен-ний при вибуховому навантаженні / В. Г. Петушков, В. М. Кудінов, н. В. Березина // Автоматичне зварювання. – 1974. – №3. – 3 37– 39.

86. Пляцко, Г. В. неруйнівний спосіб визначення залишкових сва-рочних напруг в циліндричних оболонках / Г. В. Пляцко, Е. н. Новосад, Л. П. Карасьов // Автоматичне зварювання. – 1972. – № 9. – С. 36 – 38.

87. Підвищення якості кільцевих швів корпусів судин і апаратів модернізацією зварювального стенду / Н. Р. Абдеев, Р. Р. Різванов, А. М. Файрушін, А. Р. Абдюков // Молоді вчені нового тисячоліття: Збірник статей республіканської науково-практичної конференції молодих вчених. – Уфа.: Изд-во УТИС, 2000. – С. 132-136.

88. Підвищення точності виготовлення тонкостінних оболонкових конструкцій в умовах механізованого виробництва / А. І. Дремлюга, В. С. Кириченко, В. С. Михайлов, В. М. Заїкін // Автоматичне зварювання. – 1983. – № 8. - С. 21-24.

89. Погодіна-Алексєєва, К. М. вплив ультразвуку на зняття оста-точних напруг В стали ХВГ при відпустці / К. м Погодіна-Алексєєва, Е. М. Кремлев // Металознавство і термічна обробка металів. – 1966. – № 9. – С. 7– 9.

90. Полнов, В. Г. Визначення режимів вібраційної обробки зварних конструкцій з метою зниження залишкових напруг / В. Г. Полнов, М. н. Могильнер // Зварювальне виробництво.– 1984. – № 2. – С. 32 – 34.

91. Полнов, В. Г. вплив власних коливань зварних конструкцій на усунення в них залишкових напруг вібрацією / В. Г. Полнов, В. М. Сагалевич, М. н. Могильнер // Зварювальне виробництво. -1988. – № 4. - С. 37-39.

92. Полтавцев, С. І. проблеми та шляхи підвищення довговічності та надійності зварних конструкцій об'єктів підвищеної небезпеки / С. І. Полтавцев, О. І. Стеклов // Зварювальне виробництво. – 1996. – №5. – С. 2 – 3.

93. Понікаров, І. І. машини і апарати хімічних виробництв: Підручник для вузів за спеціальністю "машини і апарати хімічних про-вигівок і підприємств будівельних матеріалів" / І. І. Понікаров. – М: Машинобудування, 1989. – 386 с.

94. Попов, о. О. Основи теорії листового штампування / О. О. Попов. – М: Машинобудування, 1977. – 278 с.

95. Потенційна енергія залишкових напруг у зварних стиках з'єднаннях / В. М. Прохоренко, І. М. Жданов, Г. М. Іщенко та ін. // авто-матичне зварювання. – 1974. – № 3. – С. 30 – 32.

96. Застосування вібраційного навантаження для зняття залишкових напруг в зварних рамах. / О. І. Зубченко, А. А. Грузд, Г. М. Орехов, А. Г. Состін // Автоматичне зварювання. – 1974. – № 9. – С. 64 – 66.

97. Застосування методу кінцевого елемента для вирішення завдань про сва-рочних деформаціях і напругах / Г. А. Бельчук, К. М. Гатовський, Г. Ю. полишко, Ю. І. Рибін // Автоматичне зварювання. – 1977. – № 11. - С. 52-56.

98. Застосування низькочастотної вібраційної обробки для стабілізації розмірів зварних і литих виробів машинобудування / А. А. Галяш, М. Ю. Козин, Н.П. Коломеєць та ін. // Важке машинобудування. – 1992. – №8. – С. 30 – 32.

99. Міцність. Стійкість. Коливання. Довідник / під ред. І. А. Біргер, і Я. Г. Паповко. Том 1. – М: Машинобудування, 1968. – 547 с.

100. Міцність, стійкість і коливання термонапружених оболочечних конструкцій / В. Ф. Грибанов, В. А. Крохін, Н.Р. Панічкін та ін—М: Машинобудування, 1990. – 368 с.

101. Рагульскіс, К. М. вібраційне старіння / К. М. Рагульскіс, Б. Б. Стульпінас, К. н. Толутіс. – Л.: Машинобудування, 1987. – 72 с.

102. Розрахунки машинобудівних конструкцій методом кінцевих елементів: Довідник / в. І. Мяченков, В. П. Мальцев, В. П. Майборода та ін – М: Машинобудування, 1989. - 520 с.

103. Розрахунок і конструювання машин і апаратів хімічних виробництв: приклади і задачі: навчальний посібник для студентів вузів / М. Ф. Михайлев, Н.П. Третьяков, А. В. – Л.: Машинобудування, 1984. – 301 с.

104. Сагалевич, В. М. термічні та деформаційні методи обробки зварних конструкцій / В. М. Сагалевич. – М.: ИНИнформтяжмаш, 1975. – №11. – 56 с.

105. Сагалевич, В. М. методи усунення зварювальних деформацій і напруг / Сагалевич В. М.-М.: Машинобудування, 1974. – 248 с.

106. Сагалевич, В. М. усунення деформацій зварних балкових конструкцій вібрацією / В. М. Сагалевич, н. Н. Завалишин, В. В. Нашивочкин / / Зварювальне виробництво. – 1971. – №9.– С. 1 – 3.

107. Сагалевич, В. М. усунення зварювальних деформацій і напруг листових конструкцій навантаженням з вібрацією / В. М. Сагалевич, А. М. Мейс-тер // Зварювальне виробництво. – 1979. – №9.– С. 9 – 12.

108. Сагалевич, В. М. стабільність зварних з'єднань і конструкцій / В. М. Сагалевич, В. Ф. Савельєв. – М: Машинобудування, 1986. – 264 с.

109. Салмін, А. Н. Удосконалення технології виготовлення зварних корпусних деталей з мартенситних сталей: дис. канд. техн. наука: 05.02.13 / Салмін Андрій Миколайович – Уфа, 2010. – 123 с.

110. Семенов, В. М. Віброобробка великих зварних конструкцій тя-желого машинобудування / В. М. Семенов, В. Є. Соломатін, Т. М. Новосьолова // Зварювальне виробництво. -1991. – № 8. – С. 25 – 26.

111. Скорняков, Л. М. Температурні поля при зварюванні кільцевих швів на циліндричних оболонках / Л. М. Кушнірів, С. М. Кисельов, Н.Н. Воронін // Автоматичне зварювання. – 1976. – № 5. – С. 12 – 15.

112. Зниження віброобробкою залишкових напруг в зварних елементах. / Оленін Є. П., Аверін А. С., Добротина Є. В., Алексєєв О. К. // Сва-рочное виробництво. – 1983. – № 5. — С. 11 – 13.

113. Зниження залишкових зварювальних напруг ультразвукової обробкой / І. Г. Полоцький, А. Я. Недосека, Г. І. Прокопенко та ін. // Автоматичне зварювання. – 1974. – № 4. – С. 74 -75.

114. Солнцев, Ю. П. Хладостойкие стали і сплави / Ю. П. Солнцев. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2005. – 480 с.

115. Сорокін, а. В. вплив залишкових напруг на розмірну стабільність зварних тонкостінних оболонок з маловуглецевих сталей / А. В. Сорокін, Ю. І. Манохін; Редкол. журн. «Автоматичне зварювання.» – Києва, 1991. – 10 с. – Деп. у ВІНТІ 28.08.90, № 3531-В91.

116. Сорокін, В. Г. Марочник сталей і сплавів / В. Г. Сорокін. – М: Машинобудування, 1989. – 690 с.

117. Стебаков, В. М. Низькотемпературна втому стикових з'єднань з низьковуглецевої сталі / В. М. Стебаков, В. П. Ларіонов // Працевдатність машин і конструкцій в умовах низьких температур. Холодостійкість матеріалів. – Якутськ, 2002 – С. 205-209.

118. Сутирін, Г. В. дослідження механізму впливу низькочастотної вібрації на кристалізацію зварювальної ванни // Автоматичне зварювання. – 1975. – № 5. – С. 7 – 10.

119. Сутырин, Р. В. Зниження залишкових напружень в зварних з'єднань низькочастотної вібраційної обробкою // Зварювальне виробництво. – 1983. – №2.– С. 22 – 24.

120. Талипов, Г. Б. Зварювальні деформації і напруги / Г. Б. Талипов. – Л.: Машинобудування, 1973. – 280 с.

121. Татаринов, Е. А. Вплив низькочастотної вібраційної обробки на розмірну стабільність зварних з'єднань // Заготівельні виробництва в машинобудуванні. – 2010. – № 10. – С. 7– 10.

122. Теорія зварювальних процесів: Підручник для вузів по спец. "Обладнання та технологія зварювального виробництва" / В. м. Волченко, В. М. Ям-Польський, В. А. Винокуров та ін.; за ред. В. В. Фролова. – М: Вища школа, 1988. – 559 с

123. Терентьев, В. Ф. Циклічна міцність металевих матеріалів: Навчальний посібник / В. Ф. Терентьев, А. А. Оксогоев. – Новосибірськ: Вид-во НГТУ, 2001. – 61 с.

124. Томленов, А. Д. Теорія пластичного деформування металів / А. Д. Тосленов. – М.: Металургія, 1972. – 408 с.

125. Труфяков, В. І. про роль залишкових напруг у зниженні виносливості зварних з'єднань // Автоматичне зварювання. – 1956. – № 5. - С. 90-103.

126. Труфяков, В. І. до розрахункової оцінки впливу зовнішнього навантаження на релаксацію залишкових зварювальних напруг / В. І. Труфяков, Ю. Ф. Кудрявцев // Автоматичне зварювання. – 1988. – № 1. – С. 7 – 9.

127. Труфяков, в. І. Про вплив залишкових напружень на опір втомі зварних з'єднань / в. І. Труфяков, Ю. ф. Кудрявцев, П. П. Мі-хеев // Автоматичне зварювання. – 1988. – № 2. – С. 1– 4.

128. Труфяков, в. І. Вплив залишкових зварювальних напруг на розвиток втомних тріщин в конструкційної сталі / в. І. Труфяков, П. П. Мі-хеев, А. З. Кузьменко // Автоматичне зварювання. – 1977. – № 10. – С. 6 -7.

129. Файрушин, А. М. Про вплив параметрів вібраційної обробки на властивості металу зварного з'єднання / А. М. Файрушин та ін. //Нафтогазова справа. 2011. Т. 9. № 2. С. 70-75.

130. Файрушин, А. М. Виготовлення зварних нафтохімічних апаратів із застосуванням вібраційної обробки. / А. М Файрушин. та ін // Управління якістю в нафтогазовому комплексі. – 2012. – № 4. – С. 30-32.

131. Хафізова, О. Ф. до впливу вібраційної обробки на механічні властивості різнорідних зварних сполук / О. Ф. Хафізова та ін. // електронний науковий журнал Нафтогазова справа. 2011. № 1. С. 210-219.

132. Квіток, А. С. Вплив низькочастотної вібраційної обробки на механічні властивості і внутрішні напруги металу зварних з'єднань конструкційних сталей / А. С. Квіток, Ю. П. Солнцев // Известия вищих навчальних закладів. Чорна металургія. 2008. № 7. С. 39-41.

133. Цветков, а. С. застосування низькочастотної віброобробки для зменшення рівня залишкових напруг в зварних великогабаритних конструкціях / А. С. Цветков, Ю. П. Солнцев // Заводська лабораторія. Діагно-стіка матеріалів. 2008. Т. 74. № 5. С. 52-53.

134. Шпеер, Ф. З. Вібраційна обробка зварних великогабаритних конструкцій з метою зменшення деформації та схильності до утворення трещин / Ф. З. Шпеер, в. І. Панов // Зварювальне виробництво. – 1983. – № 5. – С. 13 – 15.

135. Ельдарханов, А. С. вплив вібрації на Теплофізичні особливості затвердіння злитків / А. С. Ельдарханов, В. А. Єфімов // процеси лиття. -1995. – № 3. –С. 30.

136. Ельдарханов, А. С. Методика вивчення впливу вібрації формування при заготовок на установці напівнеперивного лиття / А. С. Ельдарханов, А. С. Нурадінов, Е. Д. Таранов // Ливарник Росії. -2012. –№ 8. –С. 37-40.

137. Ельдарханов, А. С. процеси кристалізації в полі пружних хвиль /А. С. Эльдaрханов– М.:Интербук, 1996 – 256 с.

138. Ельдарханов, А. С. Кавітаційне руйнування кордону затвердіння // Процеси лиття. – 1996. – № 3. - С. 16 -24.

139. Ефективність методів зниження залишкових зварювальних напруг. / А. Я. Недосека, А. А. Грузд, О. І. Зубченко, С. Б. Іщенко // Автоматичне зварювання. – 1974. – №3. – С. 66 – 69.

140. Звичайно-елементне моделювання скидання вібраційних напруг після зварювання / / представлено в американському суспільстві матеріалів. Передруковувати. – 2005

141. Томас Келсо. Зняття напруг вібрацією // інструмент і виробництво. – 1968. - №3. – Р. Р.

142. Майкл Фельдман. Додатки перетворення Гільберта в механічній вібрації. A John Wiley and sons, Ltd. Публікація, 2011. - 292 р.

143. Поплескування. 61160888 США, IC G 01 H 13/00. Спосіб роботи верстата для зняття напруг з заготовок / D. Schneider, C. Vava. – Публ. 12.09.2000

144. Поплескування. 6026687 USA, IC G 01 H 9/00. Випробування зусилля і скидати метод і прилад. / Brent Felix Juri. – Публ. 22.02.2000.

145. Поплескування. 5242512 USA, IC C 21 D 11/00. Спосіб і пристрій для зняття залишкових напруг. / У. Беглі, Ж. Р. Rosbe, Д. Г. Вілсон. – Публ. 07.09.93.

146. Поплескування. 5035142 USA, IC G 01 N 29/00. Спосіб вібраційної обробки заготовок і пристрій для проведення в дію. / А. І. Дрига, А. Н. Zadorozh-Нью-Йорк, А. М. Кузьмін, П. М. Лібман. – Публ. 30.07.91.

147. Поплескування. 4718473 USA, IC B 22 D 29/00. Прилад скидання зусилля Vibratory. Альберт Мусшут. – Публ. 12.01.88.