

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Савкина Святослава Віталійовича

УДК 621.771.004.15(043)

ДИСЕРТАЦІЯ

**Розробка методів розрахунку та вдосконалення ресурсозберігаючої
технології виробництва зварних труб із застосуванням вібрації**

132 – «Матеріалознавство»

13 – «Механічна інженерія»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ **С.В. Савкин**

Науковий керівник:

Балакін Валерій Федорович
доктор технічних наук, професор.

Дніпро – 2021

АНОТАЦІЯ

Савкин С.В. Розробка методів розрахунку та вдосконалення ресурсозберігаючої технології виробництва зварних труб із застосуванням вібрації – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 – «Матеріалознавство». – Національна металургійна академія України, Дніпро, 2021.

Дисертація присвячена дослідженню впливу вібрації в процесі зварювання трубної заготовки на рівень залишкових напружень, мікроструктуру металу та механічні властивості зварного шва та біляшовної зони.

У дисертаційній роботі отримано нові науково обґрунтовані теоретичні і експериментальні результати, які в сукупності роблять суттєвий внесок у вирішення актуальної задачі зменшення залишкових напружень, що формуються в трубній заготовці в процесі зварювання, що в підсумку дозволило запропонувати новий метод зменшення залишкових напружень, заснований на застосуванні вібрації в процесі зварювання.

З кожним роком підвищуються вимоги до вироблених зварених труб і особливу увагу тут приділяється якості зварного шва, а саме залишковим напруженням в звареному шві та біляшовній зоні, що виникають при усадці металу в процесі кристалізації. На даний момент в промислових масштабах проблема негативного впливу на трубний виріб зварювального процесу вирішується термічною обробкою всього перетину труби або локальною обробкою зварного шва та біляшовної зони за допомогою відпалу. Однак цей процес є одним з найдорожчих, тривалим по часу і не завжди екологічним. Це дає реальні передумови для пошуку альтернативного способу зняття залишкових напружень у зварних швах та біляшовній зоні прямошовних труб.

Метою дисертації є вдосконалення технологічного процесу виробництва зварних прямошовних труб за допомогою зняття залишкових напружень в

зварному шві та біляшовній зоні за допомогою вібрації. Ця мета досягається шляхом розробки математичних моделей, що описують закономірність впливу частоти вібрації при зварюванні на рівень залишкових напружень і підтверджується експериментальними дослідженнями рівня залишкових напружень і мікроструктури зразків, зварених із застосуванням різних частот вібрації.

Теоретичні дослідження виконані з використанням фундаментальних закономірностей і аналітичних методів математичного моделювання зварних з'єднань і вібраційної обробки матеріалу. Лабораторні та промислові дослідження виконані з використанням сучасного обладнання і вимірювальних приладів, підданих метрологічній повірці. Обробку експериментальних результатів і побудову моделей виконано з використанням методів планування експерименту і теорії статистичної обробки даних.

Об'єкт дослідження: процес обробки зварного шва трубної заготовки з метою зняття залишкових напружень.

Предмет дослідження: рівень залишкових напружень в зварному шві та біляшовній зоні, розмір зерен структури та різнозернистість зони термічного впливу, механічні властивості зварного шва.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що відповідно до проведених досліджень, метод зняття залишкових напружень із застосуванням вібрації в процесі зварювання дозволяє на 90% замінити термічну обробку за рівнем зняття залишкових напружень і одночасно з цим уникнути високовартісного обладнання та негативних наслідків у вигляді окалини, високої тривалості і енергоємності процесу.

Отримала подальший розвиток гіпотеза про зниження залишкових напружень в зварному шві при вібраційному впливі на нього в процесі зварювання. Ефект досягається за рахунок змін в протіканні процесу кристалізації рідкого металу під віброрезонансним впливом з частотою, що дорівнює власній частоті осциляцій на мікро- та мезоструктурному рівні будови розплаву. Це дозволяє замінювати процес зняття залишкових

напружень при виробництві труб із застосуванням термічної обробки на процес вібраційної обробки зварного шва.

Вперше експериментально встановлено вплив частоти дії вібрації в процесі зварювання трубної заготовки з вуглецевих сталей на рівень залишкових напружень і структуру зварного шва та біляшовної зони. Розробка відрізняється тим, що при впливі вібрації частотою 25-200 Герц в процесі зварювання відбувається зниження залишкових напружень в зварному шві та біляшовній зоні на 41-71% та зменшення різнозернистості мікроструктури до 16%. Це доводить позитивний ефект застосування вібрації при зниженні рівня залишкових напружень у зварних трубах.

Вперше розроблено математичну залежність необхідної тривалості вібраційного впливу від швидкості охолодження металу зварного шва при зварюванні трубної заготовки. Обчислення часу вібраційного впливу здійснюється на основі отриманої формули:

$$t_{\text{вибр}} = \frac{T_{\text{пл}} - T_{\text{р min}}}{2c\lambda\gamma \frac{(T_{\text{пл}} - T_0)^3}{\left(\frac{q}{v_{\text{св}}}\delta\right)^2}}, \text{ де } T_{\text{р min}} -$$

мінімальна температура рекристалізації; $T_{\text{пл}}$ – температура плавлення; λ – коефіцієнт теплопровідності; c – питома теплоємність; γ – щільність металу; δ – товщина металу, що зварюється; $v_{\text{св}}$ – швидкість зварювання; q – кількість тепла, що вводиться у виріб джерелом; T_0 – початкова температура виробу, що зварюється. Це дозволяє здійснювати проектування технології нових виробництв без термічної обробки та розробку обладнання вібраційного впливу на метал зварного шва для існуючих трубозварювальних станів в залежності від матеріалу і розміру труб, що зварюються.

Вперше розроблено метод розрахунку залишкових напружень зварного шва при зварюванні трубної заготовки із застосуванням вібрації. Метод відрізняється урахуванням частоти вібраційної сили та базується на чисельному вирішенні виведеного диференційного рівняння: $\ddot{y} + 2\delta\dot{y} + \omega_0^2 \cdot y = a \cdot \sin \omega \cdot t$, де y – рівень залишкових напружень, δ – логарифмічний декремент згасання коливань; ω_0 – власна циклічна частота осциляцій; a – амплітуда вимушених коливань; ω – частота вимушених коливань; t –

тривалість впливу вібрації. Розв'язання диференційного рівняння виконано методом вирішення задачі Коши. Це дозволяє визначати раціональні ресурсозберігаючі режими вібраційної обробки зварного з'єднання при виробництві зварних труб.

Ключові слова: вібраційна обробка, залишкові напруження, зварна труба, зона термічного впливу, зварний шов.

Список публікацій здобувача:

– у виданнях держав, які входять до Організації економічного співробітництва та розвитку та/або Європейського Союзу:

Balakin V.F., Kadylnykova T.M., Savkyn S.V., Kadylnykova A.V. Experimental study of the process of welding of pipe bills under vibration impact. *SWorldJournal*. 2021. №7 С. 55-63. DOI: 10.30888/2663-5712.2021-07-01-017

Balakin V.F., Kadylnykova T.M., Savkyn S.V., Kadylnykova A.V. Experimental study of the influence of vibration on the microstructure of the weld of a pipe billet. *Modern engineering and innovative technologies*. 2021. №16 С. 94-104. DOI: 10.30890/2567-5273.2021-16-01-001

Savkyn. S.V. Development of metal magnetic memory method for determining residual stresses in the production of welded pipes. *SWorldJournal*. 2021. №8. С. 6-12. DOI: 10.30888/2663-5712.2021-08-01-001

- включених до наукометричної бази «Index Copernicus»:

Криворучко А.М., Кадильников С.В. Динамическая модель вибропрессовой установки. *Сучасні проблеми металургії*. 2018. № 21. С. 24 – 28. DOI: 10.34185/1991-7848.2018.01.05

Balakin V.F., Kadylnykova T.M., Savkyn S.V. Mathematical model of a pipe welded connection under vibration. *Математичне моделювання*. 2021. №1 (44).

- включених до фахових виданнях, затверджених МОН України:

Криворучко А.М., Кадильников С.В. Математическая модель вибрационного стола для снятия остаточных напряжений в сварных трубах. *Математичне моделювання*. 2017. № 2. С. 55-59.

Кадильников С.В. Математичне моделювання процесів діагностики залишкових напружень в зварних з'єднаннях труб великих діаметрів. *Математичне моделювання*. 2018. №2(39). С. 194-200.

- патенти України:

Спосіб виробництва зварних труб з використанням вібраційної обробки: UA 148350 U : МПК C21D10/00, B23K28/00, B23K101/10 (2006.01) / Балакін В.Ф., Савкин С.В. – № u202101402, заявл. 19.03.2021; опубл. 28.07.2021, Бюл. №30, 3 с.

- які засвідчують апробацію матеріалів дисертації на наукових конференціях та семінарах:

Балакін В.Ф., Савкин С.В. Математична модель вібраційної обробки металу при зварюванні трубних заготовок. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2021* – матеріали міжнар. наук.-техн. конф. Дніпро : НМетАУ, 2021. р. С. 96-100. DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2021.01.011

Кадильникова А.В., Савкин С.В. Об особенностях применения вибрационной обработки металла при сварке. *Сучасні проблеми машинобудування. Тези доповідей конференції молодих вчених та спеціалістів, присвяченої 145-річчю з дня народження академіка НАН України Г.Ф. Проскури та 95-річчю з дня народження академіка НАН України В.Л. Рвачова*, Харків, 30 червня 2021 р. С. 31.

Кадильникова А.В., Савкин С.В. Теорія застосування вібраційної обробки металу при зварюванні трубної заготовки. *Всеукраїнська науково-технічна конференція «НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ»*, Дніпро, 24 червня 2021 року. С. 29-30.

- які додатково відображають наукові результати дисертації:

Коликов А.П., Звонарев Д.Ю., Таупек И.М., Кадильников С.В., Галимов М.Р. Математическая модель пластического формоизменения листовой заготовки для изготовления сварных труб большого диаметра. Сообщение 1.

Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Том 59. № 7. С. 455 – 461.

Коликов А.П., Звонарев Д.Ю., Таупек И.М., Кадильников С.В., Галимов М.Р. Математическая модель пластического формоизменения листовой заготовки для изготовления сварных труб большого диаметра. Сообщение 2. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* 2016. Том 59. № 9. С. 615 – 621.

Коликов А.П., Лелётко А.С., Матвеев Д.Б., Кулютин С.А., Кадильников С.В. Исследование остаточных напряжений в сварных трубах. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* 2016. Том 57. № 11. С. 48 – 53.

ABSTRACT

Savkin S.V. Improving the method of calculation and technology of production of welded pipes using vibration – Qualifying scientific work on the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy on a specialty 132 – "Materials science". – National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, 2021.

The dissertation is devoted to the research of the influence of vibration in the process of welding the billet on the level of residual stresses, metal microstructure and mechanical properties of the weld and seam zone.

In the dissertation work new scientifically substantiated theoretical and experimental results are obtained, which together make a significant contribution to solving the urgent problem of reducing residual stresses formed in the pipe billet during welding, which ultimately allowed to propose a new method of reducing residual stresses based on vibration. in the welding process.

Every year the requirements for the produced welded pipes increase and special attention is paid to the quality of the weld, namely the residual stress in the weld and the seam zone, which occur during the shrinkage of the metal during

crystallization. At the moment, on an industrial scale, the problem of negative impact on the pipe product of the welding process is solved by heat treatment of the entire cross section of the pipe or local treatment of the weld and seam area by annealing. However, this process is one of the most expensive, time consuming and not always environmentally friendly. This gives real prerequisites for finding an alternative way to relieve residual stresses in welds and seamless area of straight pipes.

The aim of the dissertation is to improve the technological process of production of welded straight-seam pipes by removing residual stresses in the weld and seamless area by vibration. This goal is achieved by developing mathematical models that describe the pattern of the effect of vibration frequency during welding on the residual stress level and is confirmed by experimental studies of the residual stress level and microstructure of samples welded using different vibration frequencies.

Theoretical researches are executed with use of fundamental laws and analytical methods of mathematical modeling of welded connections and vibration processing of material. Laboratory and industrial studies are performed using modern equipment and measuring instruments subjected to metrological verification. Processing of experimental results and construction of models was performed using experimental planning methods and the theory of statistical data processing.

Object of research: the process of processing the weld of the pipe in order to remove residual stresses.

Subject of research: the level of residual stresses in the weld and seam zone, the grain size of the structure and the variety of thermal impact zone, the mechanical properties of the weld.

The practical significance of the results is that according to research, the method of removing residual stresses using vibration during welding allows 90% to replace heat treatment by the level of residual stress and at the same time avoid high-cost equipment and negative consequences in the form of scale, high duration and energy consumption of the process.

The hypothesis of reduction of residual stresses in a weld at vibration influence on it in the course of welding received the further development. The effect is achieved due to changes in the crystallization process of the liquid metal under the vibration-resonant influence with a frequency equal to the natural frequency of oscillations at the micro and microstructural level of the melt structure. This allows you to replace the process of removing residual stresses in the manufacture of pipes using heat treatment with the process of vibration treatment of the weld.

For the first time, the influence of the frequency of vibration in the process of welding a billet of carbon steels on the level of residual stresses and the structure of the weld and seam zone was experimentally established. The development differs in that under the influence of vibration with a frequency of 25-200 Hertz in the welding process there is a reduction of residual stresses in the weld and seam zone by 41-71% and a decrease in the grain size of the microstructure to 16%. This proves the positive effect of vibration when reducing the level of residual stresses in welded pipes.

For the first time the mathematical dependence of the required duration of vibration influence on the cooling rate of the weld metal during welding of the billet was developed. The calculation of the vibration time is based on the obtained

formula: $t_{\text{вибр}} = \frac{T_{\text{пл}} - T_{\text{p min}}}{2c\lambda\gamma \frac{(T_{\text{пл}} - T_0)^3}{(\frac{q}{v_{\text{CB}}}\delta)^2}}$, where $T_{\text{p min}}$ – is the minimum recrystallization

temperature; $T_{\text{пл}}$ – melting point; λ – is the coefficient of thermal conductivity; c – is the specific heat; γ – is the density of the metal; δ – is the thickness of the weld metal; v_{CB} – welding speed; q – is the amount of heat introduced into the product by the source; T_0 – initial temperature of the welded product. This allows the design of new production technology without heat treatment and the development of equipment for vibration of the weld metal for existing pipe welding mills depending on the material and size of the pipes to be welded.

For the first time the method of calculation of residual stresses of a weld at welding of pipe preparation with an application of vibration is developed. The method differs taking into account the frequency of vibration force and is based on

the numerical solution of the derived differential equation: $\ddot{y} + 2\delta\dot{y} + \omega_0^2 \cdot y = a \cdot \sin \omega \cdot t$, where y – is the residual stress level, δ – is the logarithmic decrement of vibration damping; ω_0 – natural cyclic frequency of oscillations; a – is the amplitude of the forced oscillations; ω – is the frequency of forced oscillations; t – is the duration of vibration. The solution of the differential equation is performed by the method of solving the Cauchy problem. This allows determining the rational resource-saving modes of vibration processing of the welded joint in the production of welded pipes.

Key words: vibration treatment, residual stresses, welded pipe, heat-affected zone, welded seam.

ЗМІСТ

ВСТУП	13
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДИК ВИЗНАЧЕННЯ І ЗНЯТТЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ	20
1.1. Стан питання про дослідження виникнення залишкових напружень в зварювальних швах і біляшовній зоні.....	20
1.2. Основні вимоги до зварних труб для прокладки газопроводів	25
1.3. Аналіз методів визначення внутрішніх напружень в зварних конструкціях	28
1.4. Аналіз методів зняття внутрішніх напружень	33
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	40
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІБРАЦІЙ НА ЯКІСТЬ ЗВАРНОГО ШВА	41
2.1. Аналіз перспектив застосування вібраційної обробки при зварюванні трубних заготовок	41
2.2. Математична модель трубного зварного з'єднання, підданого вібраційному впливу	45
2.3. Динамічне моделювання конструкції вібраційного столу для зняття залишкових напруг у зварних трубах	57
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	70
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІБРАЦІЙ НА ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ ПРИ ЗВАРЮВАННЯ ТРУБ ПЛАВЛІННЯМ.....	71
3.1. Експериментальне дослідження вимірювання залишкових напружень методом рентгенівської дифрактометрії.....	71
3.2. Розробка лабораторної установки для вібраційної обробки зразків трубних заготовок	80
3.3. Методика визначення залишкових напружень з використанням методу магнітної пам'яті металу	85

3.4 Експериментальне дослідження впливу вібрації на величину залишкових напружень	88
3.5. Експериментальне дослідження впливу вібрації на мікроструктуру	105
3.6 Експериментальне дослідження впливу вібрації на механічні властивості	120
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	128
РОЗДІЛ 4. ВЕРИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ І	
ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ЗВАРНИХ ТРУБ	129
4.1. Оцінка достовірності експериментальних вимірювань рівня залишкових напружень	129
4.2. Апроксимація результатів експериментальних досліджень на основі побудови функціональної залежності	133
4.3. Розрахунки згідно математичної моделі трубного зварного з'єднання, підданого вібраційному впливу	137
4.4. Удосконалення технологічного процесу виробництва зварних труб із застосуванням вібраційної обробки	143
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4	150
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	151
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	153
ДОДАТОК А.....	165
ДОДАТОК Б	166
ДОДАТОК В.....	167
ДОДАТОК Г	168
ДОДАТОК Ґ.....	169
ДОДАТОК Д.....	170
ДОДАТОК Е	171
ДОДАТОК Є.....	172
ДОДАТОК Ж.....	173
ДОДАТОК З.....	174
ДОДАТОК І	175

ВСТУП

Актуальність теми. Останнім часом в світі зафіксована тенденція до планомірного підвищення якісних показників зварних прямошовних труб, таких як термін служби виробів, підвищення робочого тиску при експлуатації, збільшення однорідності структури зварних виробів по всьому перетину. Кожен новий етап розвитку світової системи трубопроводів тягне за собою висунення нових вимог, пов'язаних з підвищенням робочого тиску, збільшенням діаметру і товщини стінки труб, освоєнням нових родовищ в північних широтах і супроводжується все більш високими вимогами не тільки до трубних сталей та самих труб по механічним характеристикам, хімічному складу сталей, а й до технології виготовлення листового і рулонного штрипса, процесам формування труб, а також фізичним засобам контролю якості продукції.

Одним з ключових, і в той же час недостатньо вивчених, аспектів виробництва зварних труб є область зварного шва і біляшовної зони. Ця ділянка прямошовних труби за рахунок термічних процесів при зварюванні є концентратором залишкових напружень і зоною крупнозернистої і нерівномірної мікроструктури металу, що сприяє появі мікротріщин, порушенню геометрії з плином часу, а також негативно впливає на фізико-механічні характеристики трубного зварного виробу в цілому.

На даний момент в промислових масштабах проблема негативного впливу на трубний виріб зварювального процесу вирішується термічною обробкою всього перетину труби або локальної обробки зварного шва і біляшовної зони за допомогою відпалу. Однак цей процес є одним з найдорожчих, тривалим по часу і не завжди екологічним. Це дає реальні передумови для пошуку альтернативного способу зняття залишкових напружень у зварних швах і біляшовній зоні прямошовних труб.

Таким чином, тема роботи, присвяченій дослідженню впливу вібраційної обробки в процесі зварювання трубної заготовки на рівень залишкових напружень, величину зерна та різнозернистість зварного шва і

біляшовної зони є актуальною. Особливе значення цього твердження додає те, що процедура зняття залишкових напружень зварного шва є обов'язковою для труб великого діаметра (понад 530 мм).

Процес зародження залишкових напружень в зварних швах був опублікований в роботах Зайцева Н.А., Гатовського К.М., Малеткіної Т.Ю., Ніколаєва Г.А., Куркіна С. А. та ін. Дослідниками Зарезіним А.А., Ряполовым В.А., Гольдштейном Р.В. та ін. були описані методи визначення залишкових напружень і деформацій. Методи попередження та зменшення напружень та деформацій, що виникають в зварювальному процесі, описані в роботах Федосеевой Е.М., Козинцева В.М. і ін. Великий вклад в розвиток і вдосконалення експериментальних методів визначення залишкових напружень зробили такі дослідники, як Антонов А.А., Біргер І.А., Вінокуров В.А. та інші.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Виконання дисертаційної роботи пов'язане з тематичними планами наукових досліджень Національної металургійної академії України (НМетАУ), а саме «Дослідження умов виникнення поздовжньої та поперечної різностінності труб, що прокатані на ТПА 140 та розробка заходів з підвищення точності тонкостінних труб», термін виконання 2017-2018 р.р., номер держреєстрації Х102010007.

Мета і завдання дослідження.

Метою дисертації є вдосконалення технологічного процесу виробництва зварних прямошовних труб за допомогою зняття залишкових напружень в зварному шві та біляшовній зоні за допомогою вібрації. Ця мета досягається шляхом розробки математичних моделей, що описують закономірність впливу частоти вібрації при зварюванні на рівень залишкових напружень і підтверджується експериментальними дослідженнями рівня залишкових напружень і мікроструктури зразків, зварених із застосуванням різних частот вібрації.

Відповідно до зазначеної мети в роботі поставлені наступні завдання:

- 1) Проаналізувати основні методи визначення та зняття залишкових напружень в зварних трубах;
- 2) Розробити математичні моделі вібраційного впливу на трубну заготовку в процесі зварювання, що враховують власну частоту вібрації обробляемого зразка, логарифмічний декремент загасання коливань обробляемого зразка; амплітуду та частоту сили вібрації, що впливає на зразок, тривалість вібраційного впливу;
- 3) Застосувати розроблені математичні моделі при проведенні експерименту зі зварювання прямошовних труб в лабораторних умовах;
- 4) Дослідити рівень залишкових напружень і мікроструктуру зварних швів експериментально отриманих зразків і вивести закономірності їх зміни в залежності від частоти вібрації, що застосовується;
- 5) Проаналізувати і порівняти отримані теоретичні та експериментальні значення рівня залишкових напружень в зразках і зробити висновки про точність математичної моделі розрахунку рівня залишкових напружень при зварюванні із застосуванням вібрації;
- 6) Розробити технологічний процес вібраційної обробки трубних заготовок в процесі зварювання.

Об'єкт дослідження: процес обробки зварного шва трубної заготовки з метою зняття залишкових напружень.

Предмет дослідження: рівень залишкових напружень в зварному шві та біляшовній зоні, розмір зерен структури та різнозернистість зони термічного впливу, механічні властивості зварного шва.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження виконані з використанням фундаментальних закономірностей і аналітичних методів математичного моделювання зварних з'єднань і вібраційної обробки матеріалу. Лабораторні та промислові дослідження виконані з використанням сучасного обладнання і вимірювальних приладів, підданих метрологічній повірці. Обробку експериментальних результатів і побудову моделей

виконано з використанням методів планування експерименту і теорії статистичної обробки даних.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Отримала подальший розвиток гіпотеза про зниження залишкових напружень в зварному шві при вібраційному впливі на нього в процесі зварювання. Ефект досягається за рахунок змін в протіканні процесу кристалізації рідкого металу під віброрезонансним впливом з частотою, що дорівнює власній частоті осциляцій на мікро- та мезоструктурному рівні будови розплаву. Це дозволяє замінювати процес зняття залишкових напружень при виробництві труб із застосуванням термічної обробки на процес вібраційної обробки зварного шва.

2. Вперше експериментально встановлено вплив частоти дії вібрації в процесі зварювання трубної заготовки з вуглецевих сталей на рівень залишкових напружень і структуру зварного шва та біляшовної зони. Розробка відрізняється тим, що при впливі вібрації частотою 25-200 Герц в процесі зварювання відбувається зниження залишкових напружень в зварному шві та біляшовній зоні на 41-71% та зменшення різнозернистості мікроструктури до 16%. Це доводить позитивний ефект застосування вібрації при зниженні рівня залишкових напружень у зварних трубах.

3. Вперше розроблено математичну залежність необхідної тривалості вібраційного впливу від швидкості охолодження металу зварного шва при зварюванні трубної заготовки. Обчислення часу вібраційного впливу здійснюється на основі отриманої формули: $t_{\text{вibr}} =$

$$\frac{T_{\text{пл}} - T_{\text{р min}}}{2c\lambda\gamma \frac{(T_{\text{пл}} - T_0)^3}{\left(\frac{q}{v_{\text{св}}} \delta\right)^2}}, \text{ де } T_{\text{р min}} - \text{мінімальна температура рекристалізації; } T_{\text{пл}} -$$

температура плавлення; λ – коефіцієнт теплопровідності; c – питома теплоємність; γ – щільність металу; δ – товщина металу, що зварюється; $v_{\text{св}}$ – швидкість зварювання; q – кількість тепла, що вводиться у виріб джерелом; T_0 – початкова температура виробу, що зварюється. Це дозволяє здійснювати проектування технології нових виробництв без термічної обробки та розробку

обладнання вібраційного впливу на метал зварного шва для існуючих трубозварювальних станів в залежності від матеріалу і розміру труб, що зварюються.

4. Вперше розроблено метод розрахунку залишкових напружень зварного шва при зварюванні трубної заготовки із застосуванням вібрації. Метод відрізняється урахуванням частоти вібраційної сили та базується на чисельному вирішенні виведеного диференційного рівняння: $\ddot{y} + 2\delta\dot{y} + \omega_0^2 \cdot y = a \cdot \sin \omega \cdot t$, де y – рівень залишкових напружень, δ – логарифмічний декремент згасання коливань; ω_0 – власна циклічна частота осциляцій; a – амплітуда вимушених коливань; ω – частота вимушених коливань; t – тривалість впливу вібрації. Розв’язання диференційного рівняння виконано методом вирішення задачі Коши. Це дозволяє визначати раціональні ресурсозберігаючі режими вібраційної обробки зварного з’єднання при виробництві зварних труб.

Практичне значення отриманих результатів:

1) Відповідно до проведених досліджень, метод зняття залишкових напружень із застосуванням вібрації в процесі зварювання дозволяє на 90% замінити термічну обробку за рівнем зняття залишкових напружень і одночасно з цим уникнути високовартісного обладнання та негативних наслідків у вигляді окалини, високої тривалості і енергоємності процесу.

2) Виведені в ході побудови математичної моделі вібраційної обробки матеріалу при зварюванні вирази дозволяють отримати аналітичні значення залишкових напружень. Для розрахунку необхідні дані про власну частоту вібрації матеріалу, коефіцієнт затухання коливань, амплітуду та частоту вимушуючої сили вібрації. Передбачається використання даної математичної моделі в умовах промислового застосування, як методики розрахунку настройки параметрів вібраційної установки, яка застосовується в технологічному процесі виробництва труб.

3) Розроблено спосіб виробництва зварних труб із застосуванням вібраційної обробки (патент України №u202101402), що включає обробку

трубно́ї заготовки в процесі зварювання на вібраційному столі, який відрізняється тим, що в процесі зварювання попередньо закріпленої трубно́ї заготовки на неї впливають резонансними коливаннями за рахунок використання вібраційного столу, тривалість вібраційного впливу обумовлюється часом кристалізації металу в зварній ванні оброблюємої трубно́ї заготовки, а частота періодичних осциляцій пластичної течії, визначається для кожного конкретного металу відповідно до математичної моделі вібраційної обробки матеріалу при зварюванні.

Особистий внесок здобувача. У дисертації не використані ідеї співавторів публікацій. Всі принципи теоретичні та експериментальні результати, отримані в дисертації, базуються на дослідженнях, проведених автором самостійно. Особистий внесок здобувача в публікаціях зі співавторами полягає в наступному: дослідження методів модернізації технологічного процесу виробництва зварних прямошовних труб [47,48,85,86,105], математичне моделювання процесу вібраційного впливу на метал в процесі обробки [80,81,82,83,84], дослідження залишкових напружень в зварних трубах [46,96,97], дослідження мікроструктури експериментально отриманих зварних труб [98].

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися на: Міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційні Технології в Металургії та машинобудуванні – ІТММ 2021» (м. Дніпро, 2021); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні проблеми машинобудування» (м. Харків, 2021); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Наука і металургія» (м. Дніпро, 2021).

Публікації. Основний зміст дисертації викладено в 14 наукових роботах (в тому числі без співавторів – 2), серед яких: 6 статей у наукових виданнях інших країн (Німеччина, Болгарія, Росія), 2 – включених до фахових видань, затверджених МОН України, 2 – опубліковані у виданнях, що індексуються в міжнародних науково-метричних базах (Index Copernicus, Google Scholar), 1 патент України на корисну модель, 3 тези науково-технічних конференцій.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів з висновками по кожному розділу, загальних висновків, списку використаних літературних джерел і 11 додатків.

Основний текст роботи викладено на 152 сторінках. Дисертація містить 42 рисунок і 31 таблиці. Список літературних джерел з 107 найменувань, з урахуванням публікацій автора, розміщених на 12 сторінках.

Дисертацію оформлено в одному томі. Повний обсяг дисертації 175 сторінок.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДИК ВИЗНАЧЕННЯ І ЗНЯТТЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ

1.1. Стан питання про дослідження виникнення залишкових напружень в зварювальних швах і біляшовній зоні

Виникнення зварювальних залишкових напружень і деформацій було описано в роботах багатьох вчених і дослідників. Були сформовані класифікації напружень і деформацій, причини їх виникнення та різні способи їх визначення. Також досліджені та описані методи попередження залишкових напружень і деформацій, що виникають в елементах в процесі їх зварювання. Процес виникнення залишкових напружень в зварюємих елементах був описаний в працях Зайцева Н.А., Гатовського К.М., Малеткіной Т.Ю., Николаева Г.А., Куркіна С.А. та ін. [1-8]. Такі дослідники, як Зарезін А.А., Ряповалов В.А., Гольдштейн Р.В. та ін. описали методи визначення залишкових напружень і деформацій [9-15]. Методи попередження та зменшення, а також використання комп'ютерних технологій при визначенні напружень та деформацій при зварюванні описані в роботах Федосеевой Е.М., Козинцева В.М. і ін. [16-24]. У розвитку і вдосконаленні експериментальних методів визначення залишкових напружень основними є роботи Антонова А.А., Біргера І.А., Вінокурова В.А. та інших дослідників.

Перший метод визначення залишкових напружень – метод фіктивних сил був представлений в найбільш повному і закінченому вигляді в роботах Рикаліна М.М. і Николаєва Г.А [6]. Другий метод заснований на рішенні зворотної температурної задачі деформуємого середовища. Вперше даний напрямок було розроблено і представлено в працях А.Д. Бондаренко., Гольдштейн Р.В., Козинцев В.М., Куров Д.А., Попов А.Л. [7, 18,19, 23].

Електродугове зварювання характеризується різким локальним нагріванням, обумовленим впливом концентрованого джерела теплоти, що приводить метал на ділянці зварювання в пластичний та рідкий стан, і порівняно швидкому охолодженні цієї ділянки. В результаті в трубі виникають тимчасові та залишкові зварювальні напруження. Тимчасові напруження

спостерігаються тільки в процесі зварювання при зміні температури і, як правило, зникають після охолодження виробу. Залишкові напруження залишаються в зварній конструкції після закінчення зварювання, її повного остигання та зняття закріплюючих навантажень.

Залежно від протяжності силового поля і його фізичної сутності залишкові напруження бувають: I роду – макронапруження, врівноважені в межах областей, розміри яких порівнянні з розмірами виробу; II роду – мікронапруження, врівноважені в межах розміру зерен металу; III роду – субмікроскопічні напруження, врівноважені в межах декількох міжатомних відстаней.

Остаточне формування зварювальних напружень відбувається після завершення процесу зварювання і звільнення зварної конструкції від закріплень. Разом з цим відбувається перерозподіл напружено-деформованого стану конструкції, виникають залишкові деформації і внаслідок цього перерозподіляється і внутрішнє напруження конструкції. Виділяють кілька причин утворення внутрішніх залишкових напружень в зварних з'єднаннях і конструкціях [25]:

1. Локальний нерівномірний нагрів металу. У процесі зварювання, в результаті місцевого нагріву металу і його подальшого охолодження, в зварному з'єднанні утворюється нерівномірне температурне поле, виникають стискаючі і (або) розтягуючі термічні внутрішні напруження. Величина цих напружень залежить головним чином від температури нагріву, коефіцієнта лінійного розширення і теплопровідності металу, що зварюється. При цьому спочатку в конструкції, що нагрівається, з огляду на її розширення будуть виникати стискають внутрішні напруження, а при подальшому охолодженні – напруження розтягу. Коли величина внутрішніх напружень досягне рівня межі текучості, в металі почнуть відбуватися пластичні деформації, що призводять до зміни форми і розмірів виробу, що зварюється і виникнення залишкових напружень.

2. Нерівномірні структурні перетворення в металі. При зварюванні конструкцій з вуглецевих і легованих сталей при нагріванні вище критичних температур можуть виникнути напруження, обумовлені фазовими перетвореннями зі зміною типу кристалічної решітки і утворенням фази, що володіє великим питомим об'ємом та іншим коефіцієнтом лінійного розширення.

3. Ливарна усадка наплавленого металу. При охолодженні і затвердінні розплавленого металу шва відбувається його усадка. Це пояснюється тим, що при затвердінні збільшується щільність металу, в результаті чого його обсяг зменшується. Внаслідок нерозривного зв'язку наплавленого металу з основним металом, що залишаються в незмінному обсязі і протидіють усадці, в зварному з'єднанні виникають поздовжні та поперечні внутрішні напруження. В результаті поздовжньої усадки в з'єднанні виникає деформація в поздовжньому напрямку щодо осі шва, а поперечна, як правило, викликає кутові (тангенціальні) деформації.

В теорії зварювальних деформацій і напружень виділяють два основні методи вирішення завдання визначення зварювальних напружень і деформацій. Перший метод в літературі відомий як метод фіктивних сил. Цей спосіб заснований на припущеннях одномірності поля напружень і гіпотезі плоских перетинів. Він має на увазі, що в процесі охолодження металу в зоні шва виникають усадочні напруження розтягу, які представляються у вигляді активного навантаження, прикладеної до зварюваної деталі. Застосовуючи гіпотезу плоских перетинів і враховуючи, що в даному поперечному перетині внутрішні сили знаходяться в рівновазі, можна знайти основні параметри для визначення закону розподілу цих усадочних напружень. Другий метод заснований на рішенні зворотної температурної задачі деформуємого середовища. У процесі дослідження зварювальних напружень і деформацій, що виникають, встановлюється закон розподілу температури деталі, що зварюється для будь-якого моменту часу в залежності від потужності джерела і швидкості його переміщення. Далі, на підставі побудованої температурної

кривої та гіпотези плоских перетинів, знаходять як тимчасові, так і залишкові напруження і деформації для даного поперечного перетину деталі, що зварюється [26].

У зв'язку з інтенсивним розвитком обчислювальної техніки стало можливим виконання будь-яких розрахунків, в тому числі і визначення залишкових зварювальних напружень. В даний час на передній план виходять більш універсальні методики, які характеризуються простотою завдання вихідної інформації. В основі таких методик лежить, зокрема, метод кінцевих елементів, що дозволяє вирішити цю задачу (ANSYS, ABAQUS, SYSWELD). В роботі Колесникова Я.А. і Ямілева М.З. [15] чисельним моделюванням за допомогою кінцево-елементного програмного комплексу ANSYS 10.0 було досліджено напружено-деформований стан зварного шва зі сталі 15X5М з урахуванням виникнення в зварному з'єднанні і зоні термічного впливу гартівної структури. В результаті дослідження були отримані наступні результати: найбільша концентрація напружень і деформацій виникає в зоні зварного шва і в зоні сплаву, при цьому еквівалентні залишкові напруження (по Мизесу) досягають межі текучості; рівень залишкових окружних напружень при зварюванні без підігріву перевищує межу текучості металу шва на 21%; в разі зварювання з попереднім підігрівом величина максимальних еквівалентних і окружних напружень знижується в порівнянні зі зварюванням без підігріву на 15% і 17,5% відповідно, за рахунок великих пластичних деформацій в зварному шві (збільшення на 9,8%).

Для попередження напружень і деформацій при зварюванні застосовуються конструктивний і технологічний способи. Конструктивний спосіб заснований на раціональному конструюванні зварних вузлів і включає наступні заходи [27]:

1. Призначення мінімальних перетинів зварних швів (за умовами міцності) для зменшення обсягів, в яких протікають пластичні деформації.

2. Уникнення надмірних скупчень і перетинів зварних швів для зменшення площинних і об'ємних напружень, особливо в конструкціях, що сприймають ударне та змінне навантаження.

3. Розташування зварних швів симетрично центру тяжкості виробу з метою взаємного урівноваження згинальних моментів, що виникають.

4. Застосування переважно стикових швів, які є менш жорсткими і характеризуються меншою концентрацією силових напружень в порівнянні з кутовими швами.

5. Уникнення застосування накладок, косинок і т.п., що веде до збільшення площинних деформацій.

6. Застосування допоміжних елементів у вигляді ребер жорсткості з метою запобігання втрати стійкості елементів і утворення випинання в просторово-розвинутих конструкціях коробчастого перетину. Для зменшення поперечної усадки ребра жорсткості необхідно розташовувати так, щоб при зварюванні нагріванню піддавалися одні і ті ж місця основного металу.

7. Додавання до номінальних розмірів деталі припусків на усадку, рівним усадці металу для врівноваження деформацій.

8. Розташування зварювальних швів таким чином, щоб воно не заважало механізації зварювальних робіт.

Послідовність накладення швів, що застосовується, повинна забезпечувати рівновагу напружень і деформацій. Деформування від накладення попереднього шва повинно компенсуватися деформацією після накладення подальшого шва. Протилежні паралельні шви в багатьох випадках доцільно виконувати одночасно або поперемінно ділянками.

Створення сучасних технологій механічної обробки конструкційних матеріалів вимагає глибокого вивчення фізики процесів, пов'язаних з сучасними дослідженнями в області міцності і пластичності металів.

Виробничий досвід отримання зварних з'єднань, виготовлених із сталей різних модифікацій, показав, що застосування вібраційної обробки стосовно

готових зварених виробів забезпечує зниження залишкових напружень до 50% [1,2].

До теперішнього часу отримані достовірні відомості про позитивний вплив вібрації на подрібнення кристалічної структури, скорочення або повне усунення зони транскристалізації за рахунок зростання рівноосних кристалів, зниження зональної і дендритної неоднорідності, підвищення механічних і спеціальних властивостей металів і сплавів [3, 4].

Питанням експериментальних досліджень вібраційної обробки металів при зварюванні присвячена велика кількість робіт [5-9], які цей процес розглядали в двох моделях:

- проста: реалізація у вигляді одновимірних моделей і отримання результатів у вигляді релаксаційних кривих залежностей залишкових напружень і часу обробки [10-12];
- складна: реалізація у вигляді багатопараметричних моделей і отримання результатів у вигляді поверхонь станів, з визначенням точок зниження залишкових напружень [13-15].

При цьому відсутні описи моделей, що дозволяють визначати залишкові напруження в процесі релаксації. У наявних публікаціях описані тільки загальні принципи створення таких моделей [16], а також наводяться залежності, що дозволяють оцінити загальний рівень зниження залишкових напружень [17,18].

Таким чином, виникає необхідність в створенні математичної моделі вібраційної обробки матеріалу і проведення експериментальних досліджень на конструкціях різної форми, при якій можливе визначення всіх компонентів тензора напружень в довільній точці.

1.2. Основні вимоги до зварних труб для прокладки газопроводів

Аналіз стану трубного ринку за останнє десятиліття показав, що з боку вітчизняних споживачів труб великого діаметра – ПАТ «Укрнафта», НАК «Нафтогаз України», зросли вимоги до надійності і експлуатаційної працездатності цього виду труб (таблиця 1.1) [44].

Таблиця 1.1. Хронологія вимог до труб великого діаметра для прокладки газопроводів

Період	1970-і р.	1980-і р.	2005-2007 р.р.	2008-2010 р.р.	2012 р.
Діаметр труб, мм	1020	1420	1420	1420	813
Робочий тиск, МПа	5,4	7,4	9,8	11,8	28
Клас (категорія) міцності	K52 (X60)	K60 (X70)	K60 (X70)	K60,(X70), K65(X80)	K70(X90)
Температура експлуатації/будівни цтва, °C	0/-40	-20/-60	-20/-60	-20/-60	-20/-60
Ударна в'язкість, Дж/см ² : основного металу	39,2 (KCV ₀)	78,4 (KCV ₋₂₀)	107,8 (KCV ₋₂₀)	250 (KCV ₋₄₀)	230 (KCV ₋₂₀)
			Полігонні випробування		
Зварного з'єднання	29,4 (KCU ₀)	39,2 (KCU ₋₆₀)	50 (KCV ₋₂₀)	70 (KCV ₋₄₀)	70 (KCV ₋₄₀)
Антикорозійне покриття	Плівкове, трасове на 8 років		Тришарове заводське, не менше 30 років		

В останні десятиліття в світі відбувається перехід до трубопроводів нового покоління, які, в порівнянні з діючими, відрізняються підвищеною експлуатаційною ефективністю і розраховуються на робочий тиск 10..12 МПа і навіть до 24,7 МПа, замість традиційних газопроводів, розрахованих на тиск 7,5 МПа [32]. Для виготовлення таких трубопроводів застосовуються прямошовні зварні труби діаметром 1420 та 1220 мм, товщиною стінки до 50 мм і довжиною до 18,3 м, виготовлені зі сталі категорії міцності X70, X80, X90 і навіть X100 зі спеціальними технологічними властивостями [30].

Кожен етап розвитку світової трубопровідної системи супроводжується висуванням нових вимог, пов'язаних з підвищенням робочого тиску,

збільшенням діаметру і товщини стінки труб, освоєнням нових родовищ в північних широтах і висуває все більш високі вимоги не тільки до трубних сталей і самих труб по механічним характеристикам, хімічному складу сталей, а й до технології виготовлення листового і рулонного штрипса, процесам формування труб, а також фізичним засобам контролю якості продукції.

Напрямок розвитку виробництва сталей для труб магістральних трубопроводів в значній мірі визначається характером вимог, пов'язаних в свою чергу з підвищенням надійності і економічності транспортування газу і нафти.

В даний час здійснюються проекти прокладки магістральних газопроводів, розрахованих на робочий тиск 10-12 МПа. При таких тисках, на відміну від традиційного (7,5 МПа), стає особливо вигідно застосовувати сталі з міцністю більше 590 Н/мм² (X80, X90, X100), так як вони забезпечують можливість стоншування стінки труби (рисунок 1.1) [45] .

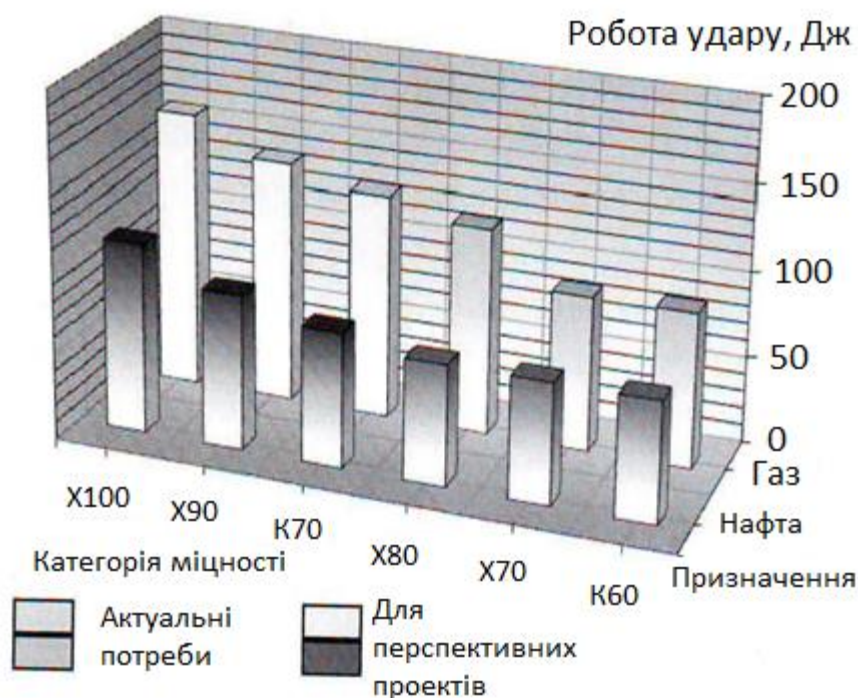


Рис. 1.1. Основні механічні характеристики трубних сталей, використовуваних для магістральних трубопроводів.

1.3. Аналіз методів визначення внутрішніх напружень в зварних конструкціях

Для дослідження внутрішніх напружень в матеріалах вже багато років використовуються різні методики неруйнівного контролю: дифракція теплових нейтронів, дифракція рентгенівських променів, ультразвукове сканування, вимірювання магнітної індукції, проникності, анізотропії, ефект Баркхаузена, магнітоакустичні ефектів, коерцитивності метод.

Дифракція теплових нейтронів.

Суть дифракційного методу вивчення напружень полягає у вимірюванні відносних зсувів дифракційних піків від положень, визначених параметрами елементарної комірки недеформованого матеріалу. Внутрішні напруження, що існують в матеріалі, викликають відповідну деформацію кристалічної решітки, що, в свою чергу, виражається в зсуві брегговських піків на дифракційному спектрі. Це дає пряму інформацію про зміну міжплощинних відстаней в виділеному обсязі, яка може бути легко перетворена в дані про внутрішні напруження, використовуючи відомі пружні константи матеріалу. Реєстрація дифракційних спектрів детекторами при кутах розсіювання 20-90° дозволяє одночасно визначати напруження в двох взаємно перпендикулярних напрямках [39].

До переваг цього методу слід віднести наступне:

- збереження цілісності досліджуваного об'єкту;
- велика глибина сканування;
- аналіз форми і ширини дифракційних піків дозволяє оцінити мікронапруження і розмір кристалітів, щільність дислокацій і точкових дефектів в матеріалі.

Недоліками цього методу є:

- малий спектр аналізу анізотропії напружень.

Дифракція рентгенівських променів.

Рентгенографічний метод – заснований на дифракції рентгенівських променів в кристалі речовини. Рентгенівські промені (електромагнітне

випромінювання) при проходженні через кристал взаємодіють з електронними оболонками атомів. В результаті цієї взаємодії відбувається дифракція рентгенівських променів і на фотоплівці виходить дифракційна картина – плями або окружності. З дифракційної картини за допомогою складних розрахунків отримують відомості про розміщення молекул в елементарній комірці кристалу і про відстані між атомами і кутах між хімічними зв'язками. Цей метод використовується для матеріалів з кристалічною структурою при пружному деформуванні і заснований на явищі інтерференції променів.

До переваг цього методу слід віднести наступне [40]:

- по дифракційному спектру можливо кількісно оцінити співвідношення кристалічних фаз, присутніх в досліджуваному зразку;
- можливість визначення модулю пружності в досліджуваному зразку.

Недоліками цього методу є:

- громіздкість і складність рентгенівської апаратури;
- низька чутливість до втомних тріщин;

Метод ультразвукового сканування.

Метод ультразвукового сканування базується на пропущенні імпульсів ультразвукових коливань через досліджуваний зразок і реєстрації розсіяних ультразвукових хвиль двома п'єзоелектричними датчиками в напрямку, перпендикулярному напрямку поширення ультразвуку в досліджуваному зразку, що контактує з іммерсійною рідиною, в якій розташовані дві акустичні лінзи. У цьому способі вимірюється час проходження ультразвукових імпульсів між двома внутрішніми областями зразка матеріалу, що знаходяться в фокальній площині першої акустичної лінзи, за допомогою двох п'єзоелектричних датчиків, розташованих в фокальній площині другої акустичної лінзи. Вимірюючи час проходження цих ультразвукових імпульсів, можна визначити швидкість ультразвуку в локальній області досліджуваного зразка, по якій знаходиться величина внутрішнього механічного напруження в зразку [41].

Доцільно пропускати імпульси ультразвукових коливань з певною частотою заповнення в конструкційний матеріал, завдяки цьому виходить послідовність ультразвукових сигналів відбитими частинками, що знаходяться в двох внутрішніх областях матеріалу. Ці сигнали реєструються прийомними п'єзоелектричними датчиками, розташованими в іммерсійній рідині в фокальній площині другої акустичної лінзи. Далі розкладають послідовність імпульсів напруження в часовий ряд Фур'є по періоду повторення ультразвукових імпульсів [41]. Змінюючи частоту повторення ультразвукових імпульсів, досягають такого значення, при якому, амплітуди гармонік ряду Фур'є не рівні нулю, а фази цих гармонік зазнають зміну на π радіанах. Ця частота відповідає певній величині швидкості ультразвуку, яка залежить від механічної напруги у внутрішній області матеріалу.

До переваг цього методу слід віднести наступне:

- збереження цілісності об'єкта, що досліджується;
- висока точність отриманих даних;

Недоліками цього методу є:

- недостатня глибина проникнення.

Коерцитивний метод.

Під коерцитивністю тут розуміється неруйнівний контроль механічних властивостей напружено-деформованого стану і ступеня втоми за вимірюваннями магнітної характеристики металу – коерцитивної сили.

Коерцитивною силою є напруженість зовнішнього магнітного поля, при якій намагніченість в матеріалі, попередньо намагніченому до насичення, стає рівною нулю. Вона визначається середньою величиною сил, що затримують необоротне зміщення кордонів між доменами при перемагнічуванні. Затримувати зміщення кордонів між доменами можуть неферомагнітні включення різної форми і дисперсності, напруження, обумовлені дислокаціями і іншими причинами, і градієнти напружень, межі фаз, зерен і субзерен, а також інші неоднорідності і дефекти кристалічної будови. Це

обумовлює той факт, що коерцитивна сила є однією з найбільш структурно-чутливих характеристик феромагнітних матеріалів [42].

До переваг цього методу слід віднести наступне:

- простота вимірювання;
- цілісність досліджуваного зразка.

Недоліками цього методу є:

- непридатність для контролю якості в виробничих умовах.

Метод магнітної пам'яті металу.

Магнітна пам'ять металу – післядія, яка проявляється у вигляді залишкової намагніченості металу виробів і зварних з'єднань, що сформувалася в процесі їх виготовлення і охолодження в слабкому магнітному полі або в вигляді незворотної зміни намагніченості виробів в зонах концентрації напружень і пошкоджень від робочих навантажень. Метод магнітної пам'яті металу – метод неруйнівного контролю, заснований на реєстрації і аналізі розподілу власних магнітних полів розсіювання (ВМПР), що виникають на виробах і обладнанні в зонах концентрації напружень (ЗКН) і дефектів металу. При цьому ВМПР відображають необоротні зміни намагніченості в напрямку дії максимальних напружень від робочих навантажень, а також структурну і технологічну спадковість деталей і зварних з'єднань після їх виготовлення і охолодження в слабкому магнітному полі, як правило, в поле Землі. У методі ВМПМ використовуються природна намагніченість і післядія, яке проявляється у вигляді магнітної пам'яті металу до фактичних деформацій і структурних змін в металі виробів і обладнання [34,35].

Фізичні основи методу ВМПМ:

- магнітопружний ефект – зміна індукції у феромагнетику, що знаходиться в зовнішньому магнітному полі під дією механічних навантажень;
- магнітомеханічний ефект – зміна вектора залишкової намагніченості феромагнітного виробу в напрямку дії максимальних напружень ВМПР, вимірюваного при контролі;

- магнітопластика – ефект формування доменів і доменних меж на скупченнях дислокацій в зонах концентрації напружень;
- ефект розсіювання магнітного поля структурними і механічними неоднорідностями в умовах природної намагніченості металу.

Магнітні параметри, які використовуються при контролі методом ВМППМ:

- нормальна і тангенціальна складова ВМПП – H_p ;
- градієнт магнітного поля по довжині (dH_p/dx) або по базі між каналами вимірювань.

Методом МППМ визначають зони концентрації напружень, основні джерела розвитку пошкоджень, мікро і макро дефекти на поверхні і в глибинних шарах металу.

До переваг цього методу слід віднести наступне:

- зачистки металу та іншої будь-якої підготовки контрольованої поверхні не потрібно;
- для виконання контролю використовуються прилади, що мають малі габарити, автономне живлення і реєструючі пристрої;
- спеціальні пристрої для сканування дозволяють контролювати трубопроводи, судини, обладнання в режимі експрес-контролю зі швидкістю 100 м/год і більше.

Для контролю внутрішніх напружень в зразку, що досліджується, був обраний метод магнітної пам'яті металу в зв'язку з його багатофункціональністю та універсальністю.

Кожен з представлених способів має свої переваги, однак з огляду на їх особливості в даній роботі було прийнято рішення використовувати метод дифракції рентгенівських променів для отримання точних величин залишкових напружень в конкретній точці та метод магнітної пам'яті металів для отримання середніх величин залишкових напружень на певній ділянці вимірювання.

1.4. Аналіз методів зняття внутрішніх напружень

У об'єктах, що досліджуються, під час їх експлуатації, виникає безліч внутрішніх напружень викликаних динамічними навантаженнями, умовами робочого середовища. Одними з найпоширеніших способів усунення внутрішніх напружень є (рис.1.2): індукційний нагрів, термічна обробка, ультразвукова ударна обробка, вібраційна обробка.

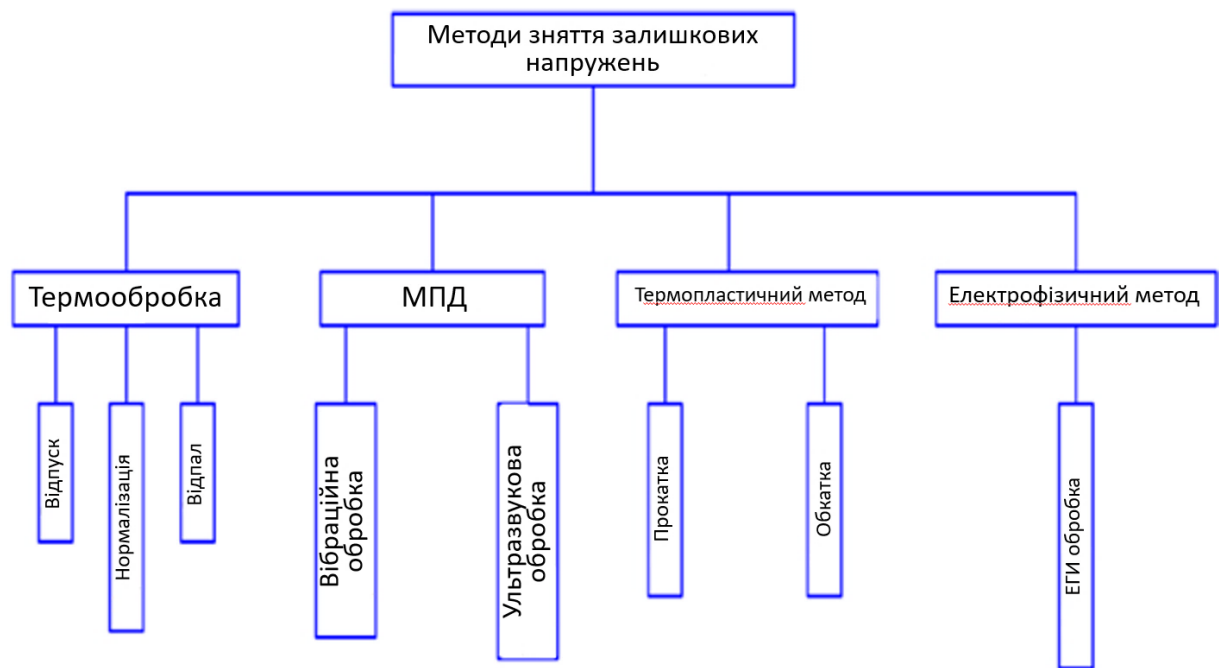


Рис. 1.2. Методи зняття залишкових напружень.

Індукційний нагрів.

Зняття залишкових напружень полягає в контрольованому застосуванні тепла, до і після деформації і механічної обробки. Це покращує якість структури металу, запобігаючи утворенню залишкових напружень. Зняття напруження може бути повним або місцевим. Воно проводиться при температурі, що відповідає характеристикам матеріалу, що оброблюється, в перебігу певного часу з подальшим контрольованим охолодженням.

Слід звертати особливу увагу на однорідне охолодження металу, особливо коли частини зразка мають різну товщину. Якщо швидкість охолодження неоднорідна, можуть виникнути нові напруження. Існують різні

способи нагріву для зняття залишкових напружень, такі як застосування газових печей, електронагрівачів або індукція.

Переваги індукційного нагріву:

- економія енергії в порівнянні з термообробкою;
- скорочення тривалості процесу;
- контроль температури;
- локалізоване тепло;
- можливість інтеграції в виробничі лінії;
- поліпшення умов праці;
- відсутність контакту.

До недоліків можна віднести наступне:

- підвищена складність обладнання, необхідність в наявності кваліфікованого персоналу для проектування установок, їх налаштування та ремонту;

- при поганому узгодженні індуктора з заготовкою потреба в великій потужності на нагрівання електричних дуг і електронагрівальних спіралей;

- використання потужного джерела електроенергії для харчування установки індукційного нагріву, а також насос і бак з охолоджувальною рідиною для охолодження індуктора;

- незважаючи на невеликі розміри індуктора, агрегат індукційного нагріву в цілому досить громіздкий і немобільний і більше підходить для стаціонарної установки в приміщенні, ніж для виїзних робіт.

Термообробка.

Термообробка проводиться для зняття внутрішніх напружень в металі виробів, що залишаються після гарячої або холодної обробки або зварювання. Термообробка буває двох видів: основна, що складається з нормалізації з відпуском, загартування, загартування з відпуском, або багатоступенева, що включає нагрів до температури нормалізації, і додаткова – у вигляді відпуску.

Термічний спосіб зняття залишкових напружень полягає в нагріванні до 600-650°C з подальшим повільним охолодженням. При температурі нагріву

600°C і подальшій витримці 5 годин відбувається зменшення тангенціальних напружень, що розтягують на 42%, а при витримці 6 годин – на 52% [42].

Найчастіше термообробка проводиться за режимом високого відпуску для зниження рівня залишкових зварювальних напружень, поліпшення структури і властивостей зварного шва і зони термічного впливу. Спосіб не виключає застосування для виконання повного відпалу, нормалізації, стабілізуючого відпалу хромонікелевих аустенітних сталей, відновлювальної термообробки, а також для інших технологічних цілей.

Термообробці може піддаватися як вся заготовка цілком одночасно, так і окремі її частини послідовно. Термообробка може проводитися на заводі-виробнику, на монтажних майданчиках і в умовах діючого виробництва при виготовленні, монтажі, ремонті та реконструкції апаратів.

Переваги термообробки:

- якість термообробки корпусного обладнання відповідає пічному нагріву виробу;
- можливість проведення термообробки при відсутності необхідного парку стаціонарних термічних печей;
- можливістю проведення робіт з виготовленню, монтажу, ремонту та реконструкції обладнання, як в заводських умовах, так і на місці експлуатації обладнання без його демонтажу;
- значне скорочення термінів робіт, пов'язаних з термообробкою;
- можливість проведення термообробки, як всієї корпусної конструкції, так і окремих її частин.

До недоліків відноситься:

- утворення окалин, шлаку;
- зміна кольору поверхні;
- висока вартість обладнання, обслуговування та догляду;
- великі габарити робочої конструкції;
- значний час протікання процесу обробки.

Ультразвукова ударна обробка.

Ультразвукова ударна обробка відноситься до методу пластичної деформації, але процес проходить на ультразвуковій частоті. Встановлено, що імпульсні і циклічні напруження, ініційовані ультразвуковою ударною обробкою, а також стискаючі напруження в поверхневих шарах пластично деформованого металу обумовлюють зниження рівня залишкових зварювальних напружень на 25-50%, а іноді і вище, при цьому підвищення межі втоми металу – в 1,5-3 рази, залежно від різних марок сталей [28,29].

Як відомо в зварному шві металоконструкцій в процесі зварювання утворюються високі розтягуючі напруження. В результаті ультразвукової ударної обробки в поверхневому шарі зразка створюються стискаючі напруження (глибина наклепу) на глибині до 2 мм, а релаксації відбуваються набагато глибше [31]. Підвищення опору втоми зварних з'єднань обумовлюється впливом двох основних чинників: зниженням розтягуючих залишкових зварювальних напружень і поверхневим пластичним деформуванням металу на ультразвуковій частоті, що призводить до утворення сприятливих напружень стиску в зонах концентраторів [33].

Ультразвукова ударна обробка, як і термічна обробка, створює в біляшовній зоні стискаючі напруження в місцях, де до обробки в процесі зварювання утворилися розтягуючі напруження. В деяких випадках це є позитивним фактором з позиції експлуатаційної надійності зварної конструкції [36-38].

Переваги ультразвукової ударної обробки:

- універсальність обладнання;
- збереження цілісності деталі;
- висока глибина наклепу.

До недоліків відноситься:

- низький рівень зняття залишкових напружень (до 50%);

Вібраційна обробка.

Суть методу полягає в створенні в оброблюваному зразку змінного напруження певної величини за допомогою механічних вібраторів. Вібрація,

як правило, здійснюється на резонансних та, близьких до резонансних частотах протягом певного проміжку часу.

В окремих випадках вібрація застосовується замість термообробки, що економічніше приблизно в 10 разів, так як має ряд наступних суттєвих переваг:

- необхідне для цього обладнання є універсальним для різних конструкцій, компактним і переносним;
- вартість обладнання, обслуговування та догляду за ним невелика;
- процес зняття зварювальних напружень протікає швидко;
- поверхню деталі після обробки залишається без змін (немає окалини, шлаку, не змінюється колір поверхні).

В результаті досліджень встановлено вплив числа циклів при певних змінних напруженнях на ступінь зниження залишкових зварювальних напружень (рис.1.3). Як видно з рис.1.2, $\sigma_{max} = 12,8 \text{ кгс/см}^2$, $\sigma_{min} = 0,56 \text{ кгс/см}^2$, найбільший спад напружень спостерігається при $8 \cdot 10^5$ циклів, при цьому максимальні залишкові напруження знижуються з 24 до 10 кгс/мм^2 [43].

Ряд досліджень висувають гіпотези, що описують механізм протікаючого процесу, проводять аналогію між зняттям залишкових напружень вібрацією і термообробкою. При цьому залишкові напруження розглядаються як наслідок переміщення атомів кристалічної решітки. З метою зниження рівня залишкових напружень необхідно внести енергію, яка змушує атоми переміщатися. Це може бути досягнуто штучним нагріванням або енергетичним впливом механічної вібрації.

Вібрація не впливає на величину залишкових напружень деяких матеріалів, наприклад деяких алюмінієвих сплавів. Найкращі результати виходять на сталях з високим або низьким вмістом вуглецю, а також на нержавіючих сталях і цирконії.

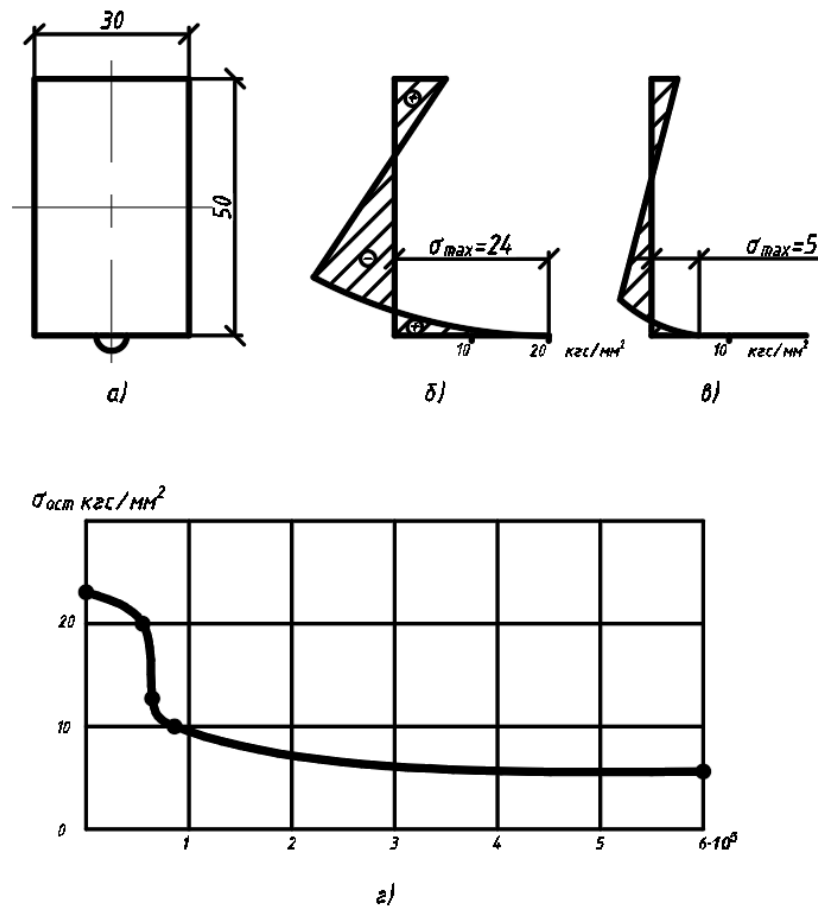


Рис. 1.3. Процес зниження залишкових напружень вібрацією:
а) образец; б) епюра напружень після зварювання; в) епюра після
вібрації.

Аналізуючи дані досліджень, Дж. Воцней і Дж. Кравмер роблять висновок, що зниження залишкових напружень в процесі вібрації досягається за рахунок поєднання напружень вібраційних і залишкових, при певних величинах яких матеріал стає пластичним. Це припущення може бути ілюстровано на діаграмі напружень (рис. 1.4) [43].

Якщо в тілі, яке має певні залишкові напруження, створити циклічно змінюють напруження, то процес зміни напружень для точки А може бути представлений в наступному вигляді. Початковий стан характеризується напруженням σ_A і деформацією ε_A . Змінне навантаження здійснюється в межах $\varepsilon_B - \varepsilon_C$.

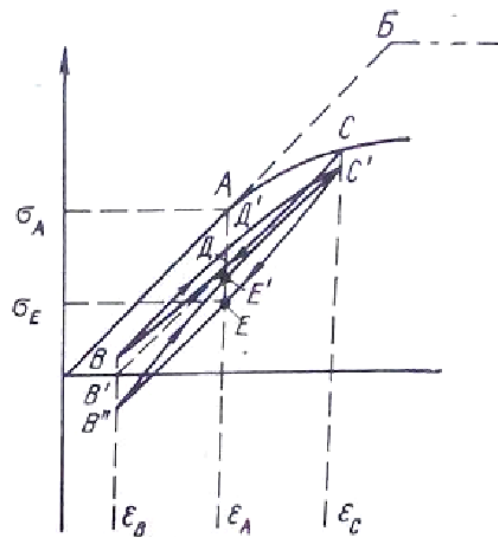


Рис. 1.4. Діаграма $\sigma - \varepsilon$ в процесі вібрації.

Першому циклу навантаження відповідає ділянка графіка АСДВД'. При цьому слід звернути увагу, що при знятті навантаження лінія СД паралельна лінії пружності на всьому протязі дії навантаження і трохи зменшується до кінця (ДВ) – ефект Баушінгера.

Наступні навантаження змушують матеріал приймати такі параметри, поки не утвориться стабільна петля гістерезиса $C'E''E'C'$. Таким чином, якщо врахувати, що в початковому стані величина залишкових напружень відповідає напруженням σ_A , то після вібрації величина напружень відповідає σ_E , а зниження залишкових напружень дорівнює різниці $\sigma_A - \sigma_E$.

Використання методу вібраційної обробки виробів знімає ряд питань, що виникають при виборі між термообробкою та вібраційною обробкою. При повному переході на спосіб вібраційної обробки під час зварювання трубної заготовки відпадає необхідність в печі, немає необхідності в транспорті і в пошуку території тимчасового зберігання, час обробки знижується до мінімуму. Сукупність економії на кожному етапі дає відчутний економічний ефект в цілому. Якщо по порівнюваним методам розглянути економічний ефект, а так само їх вплив на навколишнє середовище, умови праці робітників та інші чинники, економічно привабливим можна назвати метод вібраційної обробки.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Напруження і деформації, що виникають при зварюванні, досить добре вивчені. По даній темі існує безліч робіт дослідників, в яких були розкриті причини їх виникнення, класифікації зварювальних напружень і деформацій, методи визначення та способи запобігання.

2. В роботі було прийнято рішення використовувати метод дифракції рентгенівських променів для отримання точних величин залишкових напружень в конкретній точці та метод магнітної пам'яті металів для отримання середніх величин залишкових напружень на певній ділянці вимірювання.

3. Одними з найпоширеніших способів усунення внутрішніх напружень є: індукційний нагрів, термічна обробка, ультразвукова ударна обробка, вібраційна обробка. Для подальшого розвитку, як найбільш перспективний, обраний спосіб зняття залишкових напружень за допомогою вібраційного обробки.

4. Матеріали першого розділу опубліковані в роботах [46-48].

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІБРАЦІЇ НА ЯКІСТЬ ЗВАРНОГО ШВА

2.1. Аналіз перспектив застосування вібраційної обробки при зварюванні трубних заготовок

Згідно з результатами досліджень [49], процес деформування твердих тіл складається з серії малих періодичних осциляцій і дроблення окремих кристалічних зерен або частин монокристалу.

На мікрорівні утворення та поширення в кристалічному тілі хвилі пластичної деформації починається в місці додатку зовнішнього навантаження та полягає у виникненні місцевих концентрацій напружень зсуву, ковзанні і розмноженні дислокацій. За рахунок пластичної деформації розміри зон деформацій змінюються, зразок розвантажується, і створюються передумови для початку поперечного ковзання гвинтових дислокацій вздовж зразка і переміщенню їх на сусідні площини. Діючи як каталізатори або активні центри, вони знижують активаційні бар'єри і втягують в рух майже всі наявні дислокації. В результаті відбувається лавиноподібне наростання ковзання і утворення фронту хвилі пластичної деформації. Після проходження хвилі пластичної деформації через весь зразок відбувається перемикання обурення на зв'язані напрямки найбільших дотичних напружень і весь процес повторюється [50].

На мікрмасштабному рівні втрата зсувної стійкості кристалічної решітки відбувається в локальних зонах мікроконцентраторів напружень внаслідок серії елементарних актів релаксації. У їх ході зароджуються первинні мікрозсуви одних частин кристала щодо інших, що призводить до місцевого зниження пружних напружень. При цьому первинні мікрозсуви є хаотичними, однак до кінця стадії мікропластичності вони взаємно корелюють так, що кожен з них викликає появу наступних.

Результати досліджень [51] показали, що внаслідок багаторазових перемикань обурення на зв'язані напрямки найбільших дотичних напружень, пластична течія твердих тіл є осцилюючою.

Осцилюючий характер пластичної течії дозволяє розглядати цей процес як автоколивальний. Визначивши власну частоту осциляцій пластичної течії, можна за допомогою резонансного зовнішнього вібраційного впливу викликати штучне підвищення інтенсивності пластичної течії твердого тіла (металу або сплаву), і за рахунок цього домогтися зниження величини зусилля деформації [52].

Відомі наукові праці [53], в яких наводяться результати досліджень хвильової теорії пластичної деформації. У роботах розглядається можливість її практичного застосування для стимулювання пластичної течії твердих кристалічних тіл. Зокрема, експерименти проводилися на процесах пресування і волочіння. Згідно з даними експериментів, застосування частоти вібрації нижче 10 Герц є оптимальним для процесів пресування і волочіння трубних марок сталей, що розглядаються в даній роботі.

Відносно ж застосування вібрації при знятті залишкових напружень в зварних швах труб знайдені дані тільки про використання її при постобробці виробів, після завершення всіх зварювальних робіт і формування повних залишкових напружень в зварному шві і біляшовній зоні.

Згідно з відомими дослідженнями [54] вібраційна обробка зварних зразків з низьковуглецевої сталі на режимах, що забезпечують протікання пружно-пластичних деформацій, дозволяє зменшити напруження першого роду, виміряні тензотермічним методом, на 50-60%, а термічна обробка – на 70% і більше. Напруження другого роду в зоні сплаву, визначені рентгенівським методом, після вібраційної обробки знижуються на 45%, а після термічної обробки – на 65%. Зменшення щільності дислокацій при віброобробці і відпуску практично однакове.

Сутність даного способу вібраційної обробки зварних конструкцій полягає в застосуванні вібрації до готового виробу, з вже сформованими залишковими напруженнями, протягом певного часу за допомогою спеціальних віброзбудників. Змінні напруження, викликані віброзбудниками, підсумовуються з залишковими напруженнями, при цьому виникає

вібропоповзучість металу, яка і призводить до зниження і перерозподілу напружень [55-59].

Виходячи з основ фізичного процесу кристалізації металу і його сприйняттю вібраційних впливів найбільш близьким до процесу застигання зварного шва є процес кристалізації металу при литві сталевих злитків. Даний процес досить добре вивчений в роботах вітчизняних дослідників і дозволяє зробити припущення щодо позитивних ефектів впливу вібрації на метал зварного шва безпосередньо в процесі зварювання.

Дослідження формування кристалічних структур модельних і сталевих злитків [60,61] показали, що вібраційна обробка сталі і сплавів є, по суті, введення в розплав додаткової енергії пружних хвиль. Так як вплив вібрації на затвердіння металів і сплавів засноване на передачі енергії від джерела поля в рідкий і кристалізуючийся розплав, то цілком резонно, на думку авторів роботи [59], до опису таких процесів застосувати методи термодинаміки.

Це дало підставу авторам [62], з позицій термодинаміки, висунути гіпотезу про механізм впливу енергії зовнішніх впливів на металевий розплав: при формуванні кластерних (передзародкових, упорядкованих) структур розплаву, а потім при утворенні і зростанні з них зародків в процесі обробки системи зовнішнім впливом витрата енергії ззовні зростає для більш щільно упакованих структур, які характеризуються типами кристалічних решіток металів.

При вирішенні проблеми вибору оптимальних параметрів віброобробки слід враховувати поведінку розплаву в залежності від способу вібраційного впливу низькочастотних хвиль на метал, що твердіє [63-65]:

- при поширенні хвиль в горизонтальному напрямку від бічних імпульсів, створюваних майданчиковим вібратором виникаючи вторинні обурення викликають перемішування об'єму розплаву, в процесі якого відбувається переміщення неметалічних включень до відкритої поверхні металу і опускання кристалів, що плавають і центрів кристалізації в донну частину зливка, скорочення глибини лунки рідкого металу;

- в разі утворення стоячої хвилі виникають додаткові умови для переміщення центрів кристалізації до бічної поверхні злитка, а неметалічних включень - у глиб обсягу металу, що твердіє;

- відцентрова сила при круговій вібрації в горизонтальному напрямку переміщує центри кристалізації до кордону затвердіння, а доцентрова сила зрушує неметалеві включення, ліквати і легкоплавкі домішки у напрямку до осі злитка; дотичний напрямок швидкісного потоку по відношенню до кордону затвердіння сприяє обламуванню вершин зростаючих дендритів;

- кільцева хвиля, що біжить, забезпечує рівномірну обробку по всьому перетину злитка.

У роботах [66,67] наводяться результати досліджень впливу вібрації на кінетику і структуру затвердіння напівбезперервнолитої заготовки. Представлені результати експериментів, які вивчають вплив використання різних частот вібрації і різних місць підведення віброімпульсу на формування структури безперервнолитих заготовок.

При проведенні експериментів було зафіксовано, що оптимальною частотою вібрації при обробці безперервнолитої заготовки є 32 Гц. При даній частоті відбувається найбільш інтенсивне дроблення зерен і структура модельного сплаву здобуває найбільш однорідний вид. Оптимальним місцем підведення віброімпульсу є безпосередньо під кристалізатором.

Однак, в процесах лиття за рахунок порівняно більшого обсягу металу затвердіння відбувається повільніше, ніж в набагато меншому в поперечному перерізі обсязі рідкого металу в ванні зварного шва. У зв'язку з цим очевидно, що частота вібрації при обробці трубної заготовки в процесі зварювання повинна бути вище 32 Гц. В іншому випадку швидко застигаючий метал буде не в змозі повною мірою засвоїти силу вібраційного впливу і залишкові напруження будуть зняті менш ефективно.

2.2. Математична модель трубного зварного з'єднання, підданого вібраційному впливу

В ході вирішення поставлених у дисертаційній роботі завдань виникла необхідність математичного опису залежностей залишкових напружень, що містяться у готовій трубі, від різних параметрів вібрації, що застосовується в процесі зварювання трубної заготовки.

Основними параметрами, що впливають на процес формування залишкових напружень прийняті: власна частота вібрації; логарифмічний декремент загасання коливань; амплітуда сили вібрації, що змушує; частота сили вібрації, що змушує, і тривалість вібраційного впливу на трубну заготовку в процесі зварювання.

Частота вимушених коливань – це частота штучно викликаних коливань, вироблених вібраційною установкою з метою інтенсифікації процесу релаксації залишкових напружень в зварному шві оброблюваної заготовки.

Згідно резонансному вібропластичному ефекту, описаному в роботі В.М. Морозенко і Є.В. Кузнєцова [75], частота вимушених коливань є головним параметром процесу вібраційного впливу на оброблюваний метал, так як саме за допомогою регулювання частоти вимушених коливань представляється можливим синхронізувати її з власною частотою коливань оброблюваного металу.

Власною частотою коливань є набір характерних для коливальної системи типів гармонічних коливань. Кожне з нормальних коливань фізичної системи, таких як коливання атомів в молекулах, характеризується своєю частотою. Така частота називається нормальної або власною частотою коливань частинки.

Під частинкою тут і нижче мається на увазі невеликий локалізований об'єкт, якому можна приписати кілька фізичних або хімічних властивостей, таких як об'єм, щільність або маса. Вони сильно розрізняються за розміром або значенням, від субатомних частинок, таких як електрон, до мікроскопічних частинок, таких як атоми та молекули, до макроскопічних частинок, таких як

порошки та інші гранульовані матеріали. Таким чином, зерна металу, що зароджуються в розплаві, та сформовані зерна кристалізованого металу можуть називатися частинками.

Даний параметр має великий вплив на формування залишкових напружень при кристалізації зварного шва під впливом вібрації, так як вібрація сама по собі не має суттєвого впливу на метал, не входячи в резонанс із власною частотою коливань оброблюваного металу.

Додавання даного параметра в розрахунок ґрунтується на явищі резонансного вібропластичного ефекту. Згідно з ним, процес релаксації залишкових напружень, що відбувається в металі з часом, багаторазово прискорюється. Даний ефект підтверджується в роботі В.М. Морозенко і Є.В. Кузнецова про резонансний вібропластичний ефект [75], що описує процеси волочіння.

Логарифмічний декремент загасання коливань – безрозмірна фізична величина, що описує зменшення амплітуди коливального процесу, що являється величиною, зворотною числу коливань, після закінчення яких амплітуда коливань зменшиться в e раз.

Логарифмічний декремент загасання коливань пов'язаний з коефіцієнтом загасання залежністю [104]:

$$\delta = \ln \beta \quad (2.1)$$

де δ – логарифмічний декремент загасання коливань; β – коефіцієнт загасання коливань.

Логарифмічний декремент загасання коливань характеризує собою силу, що протидіє поширенню вібрації. Без урахування цього параметра розрахункові значення залишкових напружень матимуть занадто велику погрішність щоб вважатися коректними.

Амплітуда вимушених коливань. Одним з основоположних питань при вирішенні задачі про застосування вібраційного впливу при знятті залишкових напружень є пошук оптимальної амплітуди вібрації.

Відомі роботи [68], в яких авторами були досліджені процеси застосування вібраційного впливу з метою отримання високоякісних дрібнокристалічних виливків зубки шарошки бурового долота. Вібраційній обробці піддавався розплав хромонікелевої сталі в процесі кристалізації. Метою дослідження було знаходження взаємозв'язку між застосовуваною частотою вібрації і розміром зерна структури одержуваного злитка.

Згідно з даними досліджень [68], оптимальна амплітуда вимушених коливань частинки металу розраховується за допомогою такої формули:

$$a = \frac{F_b}{m_{\text{ч}} \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2 \omega^2}} \quad (2.1)$$

де F_b – вібраційна сила; $m_{\text{ч}}$ – маса частинки; ω_0 – частота власних коливань; ω – частота вимушених коливань; δ – коефіцієнт загасання коливань.

Вібраційна сила F_b згідно [69] обчислюється за формулою:

$$F_b = g(v_1 \rho_1 - m_{\text{ч}}) \frac{kA^2 \omega^2}{|k|K^2 |y_r| y_r^3} \quad (2.2)$$

де g – прискорення вільного падіння; v_1 – швидкість кристалізації розплаву сталі; ρ_1 – щільність розплаву сталі; $m_{\text{ч}}$ – маса частинки; k – постійні величини для заданого матеріалу (згідно Холу-Петчу [70]); A – амплітуда вимушених коливань; ω – частота вимушених коливань; y_r – координата розташування частинки відносно ливарної форми.

$$K = \frac{m_{\text{ч}} - \rho_1 V_1}{\rho_1 V_1} \quad (2.3)$$

де V_1 – обсяг розплаву, витіснений твердою часткою зерна металу.

Поряд з амплітудою вібрації час вібраційного впливу на метал зварного шва також є дуже важливим параметром процесу. Так при недостатньому часі обробки вібрація не дасть необхідного ефекту, а при надмірному буде перевитрата енергії та зниження продуктивності.

При різних видах зварювальних процесів тривалість зварювання відрізняється, а значить і тривалість вібраційного впливу буде різною. Разом з початком зварювального процесу паралельно починається процес кристалізації металу зварного шва, отже, кажучи про тривалість вібраційного впливу на метал зварного шва мається на увазі тривалість застосування вібрації після закінчення зварювання, маючи на увазі застосування вібрації також і в процесі зварювання.

Ймовірно, вібрація має найбільший вплив на структуру металу і рівень залишкових напружень зварного шва і біляшовної зони при температурі не нижче температури рекристалізації.

Згідно з дослідженнями А.А. Бочвара [71], температуру рекристалізації при зварювальному процесі можна умовно представити таким співвідношенням:

$$T_{p\ min} \cong 0,4 T_{пл} \quad (2.4)$$

де $T_{p\ min}$ – мінімальна температура рекристалізації; $T_{пл}$ – температура плавлення.

Таким чином можна вивести залежність:

$$t_{вібр} = \frac{T_{пл} - T_{p\ min}}{w_{охл}} \quad (2.5)$$

де $w_{охл}$ – швидкість охолодження металу в зварному з'єднанні.

Виходячи з цього припущення для обчислення часу вібраційного впливу необхідно відняти від температури плавлення обробляемого металу його мінімальну температуру рекристалізації. Отримане значення ділиться на швидкість охолодження металу в зварному з'єднанні при зварюванні листа з наскрізним проплавленням, яка розраховується за формулою М.М. Рикаліна [71].

$$w_{\text{охол}} = 2c\lambda\gamma \frac{(T - T_0)^3}{\left(\frac{q}{v_{\text{зв}}}\delta\right)^2} \quad (2.6)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності; c – питома теплоємність; γ – щільність металу; δ – товщина зварюваного металу; $v_{\text{зв}}$ – швидкість зварювання; q – кількість тепла, що вводиться у виріб джерелом; T_0 – початкова температура, виробу, що зварюється; T – поточна температура зварного шва.

Підставивши (2.6) в (2.5) отримуємо формулу тривалості вібраційного впливу на метал зварного шва:

$$t_{\text{вібр}} = \frac{T_{\text{пл}} - T_{\text{р min}}}{2c\lambda\gamma \frac{(T_{\text{пл}} - T_0)^3}{\left(\frac{q}{v_{\text{зв}}}\delta\right)^2}} \quad (2.7)$$

При цьому необхідно відзначити, що швидкість зміни температури зварного шва в часі нелінійна. Інтенсивність охолодження знижується по мірі наближення до початкової температури виробу, що зварюється. Однак, з огляду на низький рівень впливу на кінцевий результат, при розрахунку тривалості вібраційного впливу прийнята усереднена швидкість охолодження металу зварного шва.

При створенні математичної моделі вібраційної обробки матеріалу при зварюванні за основу було взято відоме диференціальне рівняння вимушених коливань при наявності тертя [72], представлене нижче:

$$\ddot{x} + 2\lambda\dot{x} + \omega_0^2 \cdot x = \frac{f}{m} \cdot \cos \gamma t \quad (2.8)$$

де x – відхилення координати від її рівноважного значення; λ – коефіцієнт згасання коливань; γ – частота коливань, що змушують; ω_0 – частота власних коливань; f – коефіцієнт тертя; m – маса частинки; t – час вібраційного впливу.

Імовірно, відхилення координати від рівноважного положення повинно в значній мірі корелювати з рівнем залишкових напружень. Таким чином, x – відхилення координати від її рівноважного значення, замінюється на y – рівень залишкових напружень.

З метою конкретизації параметрів, що впливають на технологічний процес зварювання трубної заготовки із застосуванням вібрації, коефіцієнт тертя поділений на масу частинки $\frac{f}{m}$ замінюється на амплітуду вимушених коливань a .

Удосконаливши рівняння (2.8) і застосувавши до обчислення залишкових напружень вдалося отримати основу для створення математичної моделі, що дозволяє обчислити залишкові напруження при наявності інформації про інших параметрах процесу:

$$\ddot{y} + 2\delta\dot{y} + \omega_0^2 \cdot y = a \cdot \sin \omega t \quad (2.9)$$

де y – рівень залишкових напружень; δ – логарифмічний декремент загасання коливань; ω – частота вимушених коливань; ω_0 – власна циклічна частота осциляцій; t – час вібраційного впливу; a – амплітуда вимушених коливань.

Рівняння (2.9) являє собою лінійне неоднорідне диференціальне рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами і спеціальної правою частиною.

Рішення (2.9) має вигляд:

$$y = \bar{y} + y^* \quad (2.10)$$

де $\bar{y}$ – спільне рішення лінійного однорідного диференціального рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами, відповідного неоднорідному диференціальному рівнянню; y^* - приватне рішення лінійного неоднорідного диференціального рівняння (2.9).

Лінійне однорідне диференціальне рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами, відповідне неоднорідному диференціальному рівнянню (2.9), має вигляд:

$$\ddot{y} + 2\delta\dot{y} + \omega_0^2 \cdot y = 0 \quad (2.11)$$

Для вирішення (2.11) складаємо характеристичне рівняння, яке представляє собою квадратне рівняння виду:

$$k^2 + 2\delta \cdot k + \omega_0^2 = 0 \quad (2.12)$$

Рішення (2.12) розглядаємо для 3-х випадків: $D > 0$; $D = 0$; $D < 0$. Тут $D = 4(\delta^2 - \omega_0^2)$ – дискримінант квадратного рівняння.

I. Випадок $D > 0$: корені k_1, k_2 рівняння (2.12) різні, дійсні. Тоді $\delta > \omega_0$; $k_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{D}$. Загальне рішення (2.12) має вигляд:

$$\bar{y} = e^{k_1 \cdot t} \cdot c_1 + e^{k_2 \cdot t} \cdot c_2 \quad (2.13)$$

II. Випадок $D = 0$: корені k_1, k_2 рівняння (2.12) кратні, дійсні. Тоді $\delta = \omega_0$; $k_{1,2} = -\delta$. Загальне рішення (2.12) має вигляд:

$$\bar{y} = e^{\delta \cdot t} (c_1 + c_2 \cdot t) \quad (2.14)$$

III. Випадок $D < 0$: корені k_1, k_2 рівняння (2.12) комплексно зв'язані. Тоді $\delta < \omega_0$; $k_{1,2} = -\delta \pm i \cdot \sqrt{\tilde{D}}$, где $\tilde{D} = 4(\omega_0^2 - \delta^2)$. Загальне рішення (2.12) має вигляд:

$$\bar{y} = e^{\delta \cdot t} \left(c_1 \cdot \cos \sqrt{\tilde{D}} \cdot t + c_2 \cdot \sqrt{\tilde{D}} \cdot t \right) \quad (2.15)$$

Тут c_1 і c_2 – довільні постійні.

Приватне рішення (2.9) запишемо у вигляді:

$$y^* = A \cdot \cos(\omega t) + B \cdot \sin(\omega t) \quad (2.16)$$

Знайдемо похідні першого і другого порядку від y^* :

$$y^{*'} = -\omega \cdot A \cdot \sin(\omega t) + \omega \cdot B \cdot \cos(\omega t) \quad (2.17)$$

$$y^{*''} = -\omega^2 A \cdot \cos(\omega t) - \omega^2 B \cdot \sin(\omega t) \quad (2.18)$$

Підставляючи (2.16)-(2.18) в (2.9) і прирівнюючи коефіцієнти при $\sin(\omega \cdot t)$ та $\cos(\omega \cdot t)$, отримуємо вирази для невідомих A та B :

$$A = \frac{2 \cdot \delta \cdot \omega \cdot a}{4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2}; \quad B = \frac{a \cdot (\omega^2 - \omega_0^2)}{4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \quad (2.19)$$

Підставляючи (2.19) в (2.16), отримуємо приватне рішення рівняння (2.9) у вигляді:

$$y^* = \frac{2 \cdot \delta \cdot \omega \cdot a}{4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \cdot \cos(\omega t) + \frac{a \cdot (\omega^2 - \omega_0^2)}{4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \cdot \sin(\omega t) \quad (2.20)$$

Тоді загальне рішення для випадків I, II, III, згідно (2.10), (2.13)-(2.15), (2.20), буде мати вигляд:

$$y_I = e^{(-\delta-\sqrt{D})\cdot t} \cdot c_1 + e^{(-\delta+\sqrt{D})\cdot t} \cdot c_2 + \frac{2 \cdot \delta \cdot \omega \cdot a}{4\delta^2\omega^2+(\omega^2-\omega_0^2)^2} \cdot \cos(\omega t) + \frac{a \cdot (\omega^2 - \omega_0^2)}{4\delta^2\omega^2+(\omega^2-\omega_0^2)^2} \cdot \sin(\omega t) \quad (2.21)$$

$$y_{II} = e^{-\delta \cdot t} (c_1 + c_2 t) + \frac{2 \cdot \delta \cdot \omega \cdot a}{4\delta^2\omega^2+(\omega^2-\omega_0^2)^2} \cdot \cos(\omega t) + \frac{a \cdot (\omega^2 - \omega_0^2)}{4\delta^2\omega^2+(\omega^2-\omega_0^2)^2} \cdot \sin(\omega t) \quad (2.22)$$

$$y_{III} = e^{-\delta \cdot t} \cdot (c_1 \cdot \cos\sqrt{D} \cdot t + c_2 \cdot \sin\sqrt{D} \cdot t) + \frac{2 \cdot \delta \cdot \omega \cdot a}{4\delta^2\omega^2+(\omega^2-\omega_0^2)^2} \cdot \cos(\omega t) + \frac{a \cdot (\omega^2 - \omega_0^2)}{4\delta^2\omega^2+(\omega^2-\omega_0^2)^2} \cdot \sin(\omega t) \quad (2.23)$$

Для знаходження довільних постійних c_1 та c_2 скористаємося початковими умовами:

$$\begin{cases} y(0) = 0; \\ y'(0) = 0. \end{cases} \quad (2.24)$$

Знайдемо перші похідні по t від функції y_I , y_{II} , y_{III} :

$$y'_I = (-\delta - \sqrt{D}) \cdot e^{(-\delta-\sqrt{D})\cdot t} \cdot c_1 + (-\delta + \sqrt{D}) \cdot e^{(-\delta+\sqrt{D})\cdot t} \cdot c_2 - \frac{2 \cdot \delta \cdot \omega^2 \cdot a}{4\delta^2\omega^2+(\omega^2-\omega_0^2)^2} \cdot \sin(\omega t) + \frac{a \cdot \omega^2 \cdot (\omega^2 - \omega_0^2)}{4\delta^2\omega^2+(\omega^2-\omega_0^2)^2} \cdot \cos(\omega t) \quad (2.25)$$

$$y_{II}' = c_2 \cdot e^{-\delta \cdot t} - \delta \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot (c_1 + c_2 \cdot t) - \frac{2 \cdot \delta \cdot \omega^2 \cdot a}{4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \cdot \sin(\omega t) +$$

$$+ \frac{a \cdot \omega^2 \cdot (\omega^2 - \omega_0^2)}{4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \cdot \cos(\omega t) \quad (2.26)$$

$$y_{III}' = -\delta \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot (c_1 \cdot \cos \sqrt{D} \cdot t + c_2 \cdot \sin \sqrt{D} \cdot t) +$$

$$e^{-\delta \cdot t} \cdot (-c_1 \cdot \sqrt{D} \sin \sqrt{D} \cdot t + c_2 \cdot \sqrt{D} \cdot \cos \sqrt{D} \cdot t) -$$

$$- \frac{2 \cdot \delta \cdot \omega^2 \cdot a}{4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \cdot \sin(\omega t) + \frac{a \cdot \omega^2 \cdot (\omega^2 - \omega_0^2)}{4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \cdot \cos(\omega t) \quad (2.27)$$

Для випадку I скористаємося початковими умовами (2.24): знайдемо значення y_I та y_I' при $t = 0$. Отримуємо:

$$c_1 + c_2 + \frac{2 \cdot \delta \cdot \omega \cdot a}{4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} = 0 \quad (2.28)$$

$$(-\delta - \sqrt{D}) \cdot c_1 + (-\delta + \sqrt{D}) \cdot c_2 + \frac{a \cdot \omega^2 \cdot (\omega^2 - \omega_0^2)}{4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} = 0 \quad (2.29)$$

Вирішуючи спільно (2.26) і (2.27), отримуємо:

$$c_1 = \frac{a \cdot \omega \cdot [2\delta \cdot (-\delta + \sqrt{D}) + \omega \cdot (\omega^2 - \omega_0^2)]}{2\sqrt{D}(4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2)} \quad (2.30)$$

$$c_2 = \frac{-a \cdot \omega \cdot [2\delta \cdot (\delta + \sqrt{D}) + \omega \cdot (\omega^2 - \omega_0^2)]}{2\sqrt{D}(4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2)} \quad (2.31)$$

Підставляючи (2.30) і (2.31) в (2.21), отримуємо приватне рішення (рішення задачі Коші) для випадку I у вигляді:

$$\begin{aligned}
y_I = & e^{(-\delta - \sqrt{D}) \cdot t} \frac{a \cdot \omega \cdot [2\delta \cdot (-\delta + \sqrt{D}) + \omega \cdot (\omega^2 - \omega_0^2)]}{2\sqrt{D}(4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2)} + \\
& + e^{(-\delta + \sqrt{D}) \cdot t} \frac{-a \cdot \omega \cdot [2\delta \cdot (\delta + \sqrt{D}) + \omega \cdot (\omega^2 - \omega_0^2)]}{2\sqrt{D}(4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2)} + \\
& + \frac{2 \cdot \delta \cdot \omega \cdot a}{4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \cos(\omega t) + \frac{a \cdot (\omega^2 - \omega_0^2)}{4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \sin(\omega t) \quad (2.32)
\end{aligned}$$

Для випадку II скористаємося початковими умовами (2.24): знайдемо значення y_{II} та y'_{II} при $t = 0$. Отримуємо:

$$c_1 + \frac{2 \cdot \delta \cdot \omega \cdot a}{4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} = 0 \quad (2.33)$$

$$-\delta c_1 + c_2 + \frac{a \cdot \omega^2 \cdot (\omega^2 - \omega_0^2)}{4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} = 0 \quad (2.34)$$

Вирішуючи спільно (2.33) і (2.34), отримуємо:

$$c_1 = -\frac{2 \cdot \delta \cdot \omega \cdot a}{4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \quad (2.35)$$

$$c_2 = -\frac{a \cdot \omega^2 \cdot (\omega^2 - \omega_0^2) + 2\delta^2 \cdot \omega \cdot a}{4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \quad (2.36)$$

Підставляючи (2.35) і (2.36) в (2.22), отримуємо приватне рішення (рішення задачі Коші) для випадку II у вигляді:

$$\begin{aligned}
y_{II} = & e^{-\delta \cdot t} \cdot \left(-\frac{2 \cdot \delta \cdot \omega \cdot a}{4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} - \frac{a \cdot \omega^2 \cdot (\omega^2 - \omega_0^2) + 2\delta^2 \cdot \omega \cdot a}{4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \cdot t \right) + \\
& + \frac{2 \cdot \delta \cdot \omega \cdot a}{4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \cdot \cos(\omega t) + \frac{a \cdot (\omega^2 - \omega_0^2)}{4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \cdot \sin(\omega t) \quad (2.37)
\end{aligned}$$

Для випадку III скористаємося початковими умовами (2.24): знайдемо значення y_{III} та y'_{III} при $t = 0$. Отримуємо:

$$c_1 + \frac{2 \cdot \delta \cdot \omega \cdot a}{4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} = 0 \quad (2.38)$$

$$-\delta c_1 + c_2 + \frac{a \cdot \omega^2 \cdot (\omega^2 - \omega_0^2)}{4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} = 0 \quad (2.39)$$

Вирішуючи спільно (2.38) і (2.39), отримуємо:

$$c_1 = -\frac{2 \cdot \delta \cdot \omega \cdot a}{4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \quad (2.40)$$

$$c_2 = -\frac{a \cdot \omega^2 \cdot (\omega^2 - \omega_0^2) + 2\delta^2 \cdot \omega \cdot a}{4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \quad (2.41)$$

Підставляючи (2.40) і (2.41) в (2.23), отримуємо приватне рішення (рішення задачі Коші) для випадку III у вигляді:

$$y_{III} = e^{-\delta \cdot t} \cdot \left(\begin{aligned} & -\frac{2 \cdot \delta \cdot \omega \cdot a}{4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \cdot \cos\sqrt{\tilde{D}} \cdot t - \\ & -\frac{a \cdot \omega^2 \cdot (\omega^2 - \omega_0^2) + 2\delta^2 \cdot \omega \cdot a}{4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \cdot \sin\sqrt{\tilde{D}} \cdot t \end{aligned} \right) + \\ + \frac{2 \cdot \delta \cdot \omega \cdot a}{4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \cdot \cos(\omega t) + \frac{a \cdot (\omega^2 - \omega_0^2)}{4\delta^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \cdot \sin(\omega t) \quad (2.42)$$

Таким чином, вирази (2.32), (2.37) і (2.42) являють собою спільне рішення диференціального рівняння (2.9) і дозволяють отримати аналітичні значення залишкових напружень маючи дані про власну частоту вібрації,

логарифмічний декремент загасання коливань, амплітуду і частоту сили, що вимушує вібрації, тривалість впливу вібрації.

2.3. Динамічне моделювання конструкції вібраційного столу для зняття залишкових напруг у зварних трубах

Технологія вібраційної обробки зварних швів та біляшовної зони для зняття залишкових напружень досить докладно описані в науково-технічній і патентній літературі [73,74]. Ефективність застосування такої обробки для високоміцних, мостових і теплостійких марок сталей (ВКС-12, 15Г2Ф, 12Х1МФ, 12Х18Н10Т, 1Х18Н9Т, 20ХГНСНА) описана в працях різних провідних дослідницьких центрів України та СНД (ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ, м Київ, Україна, ІФПМ СО РАН, м. Томськ, Росія, РДУ нафти і газу імені І.М. Губкіна, м. Москва, Росія). Разом з тим недостатньо проведені дослідження в області вібраційної обробки зварних з'єднань в процесі виробництва труб [75].

Кожен з відомих методів зниження залишкових напружень має більш-менш обмежену область раціонального застосування, тому виникає необхідність як удосконалення існуючих, так і пошуку принципово нових способів обробки труб з метою зняття залишкових напружень, а також зміцнення, стабілізації геометрії, зміни структурного стану [76].

У промислових масштабах обробка виробів може проводитися на вібростенді, вбудованому в технологічний процес на ділянці зварювання, і вестися автоматично. Для стабілізації напружень в виробничих умовах зазвичай використовують вібраційні столи. Спочатку, в залежності від маси оброблюваної конструкції, на віброустановці задається необхідне розташування дисбалансу, яке, в свою чергу, визначає величину змушуючої сили. Потім за допомогою частотного регулятора, встановленого на конструкції задаються резонансні частоти вібрації, в межах робочого діапазону частот віброустановки.

Принцип роботи вібраційного столу полягає в створенні резонансних коливань на попередньо закріплений зразок. Задані коливання створюються електродвигуном, за рахунок розміщення в ньому ексцентрикових вантажів.

Регулювання частоти здійснюється перетворювачем частоти, а регулювання амплітуди – за рахунок зміщенням ексцентрикових вантажів щодо ротора двигуна. Однією з основних складових конструкції вібраційного столу є вібраційні опори. Вони призначені для компенсації та ізоляції вібрації, забезпечують зниження ударних навантажень, компенсацію розтяжних навантажень і дефекту виготовлення вузла. Для виготовлення вібраційного столу в першу чергу необхідно розрахувати його віброізоляцію. Виникає також завдання визначення допустимих параметрів вібрації робочих місць. Слід зазначити, що при складанні вібраційного столу, важливим елементом є раціональне розташування електродвигуна, що дозволяє отримати в досліджуваному зразку рівномірні по всій довжині робочої зони і синусоїдально змінні вібраційні коливання.

Будемо розглядати вібраційний стіл, робочий орган якого є досить жорстким тілом, пов'язаним з нерухомою основою досить м'якими пружними елементами. Будемо вважати, що осі обертання дебалансних збудників розташовуються паралельно одній з головних центральних осей інерції робочого органу і що площини обертання центрів тяжіння невірноважених мас збігаються між собою, тобто обмежимося рішенням плоскої задачі [77].

Динамічна схема розглянутого вібраційного столу приведена на рис. 2.1. Конструктивна схема вібраційного столу представлена на рис. 2.2.

Початок координат O вибрано в загальному статичному центрі мас системи. Ось OX спрямована по прямій, що з'єднує центри O_r обертання вібраторів. Ось OY спрямована перпендикулярно осі OX . Центр тяжкості O_0 корпусу вібраційного столу має координати $(a_0; b_0)$; центри тяжкості O_{mi} рухомих елементів, відповідно, мають координати $(a_i; b_i)$. Лінії відносного зміщення $K_i - K_i$ виявляються похилими до осі OY під кутами β_i .

Положення системи в будь-який момент часу однозначно визначається сукупністю узагальнених координат X, Y, θ, f_i . Кінетична і потенційна енергія системи виражаються залежностями:

$$\begin{aligned}
 T = & \frac{1}{2}M(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2) + \frac{1}{2}\sum_{i=1}^n m_i \dot{f}_i^2 + \frac{1}{2}I\dot{\theta}^2 + \\
 & + \sum_{i=1}^n m_i \dot{f}_i (\dot{X} \sin \beta_i + \dot{Y} \cos \beta_i + \rho_i \dot{\theta}), \\
 \Pi = & \frac{1}{2}\sum_i^n C_i f_i^2
 \end{aligned} \tag{2.43}$$

де $M = M_0 + \sum_{i=1}^n m_i$,

$\rho_i = (b_i \sin \beta_i - a_i \cos \beta_i)$,

$I = I_0 + \sum_{i=1}^n I_{mi} + M_0(a_0^2 + b_0^2) + \sum_i^n (a_i^2 + b_i^2)$.

Тут: C_i – коефіцієнти жорсткості пружних систем; M_0, I_0, m_i, I_{mi} – маси і моменти інерції корпусу і пружно приєднаних тіл [77].

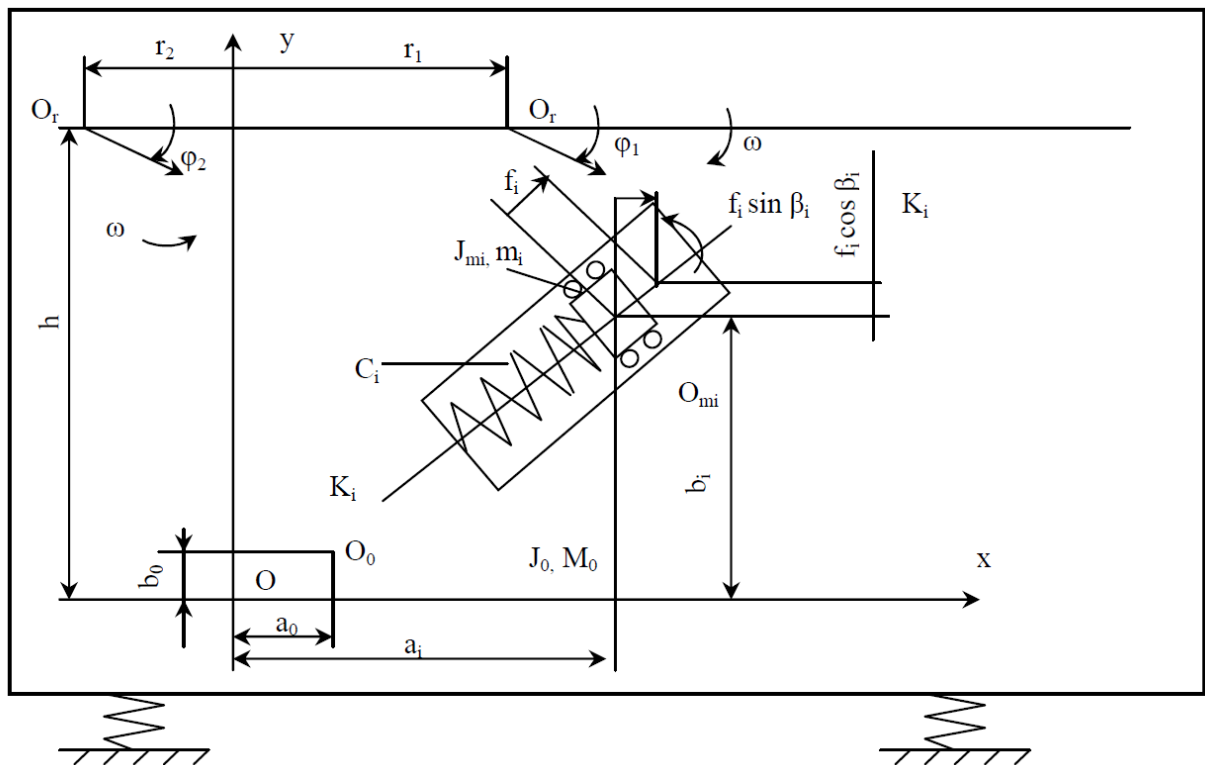


Рис. 2.1. Динамічна система вібраційного столу.

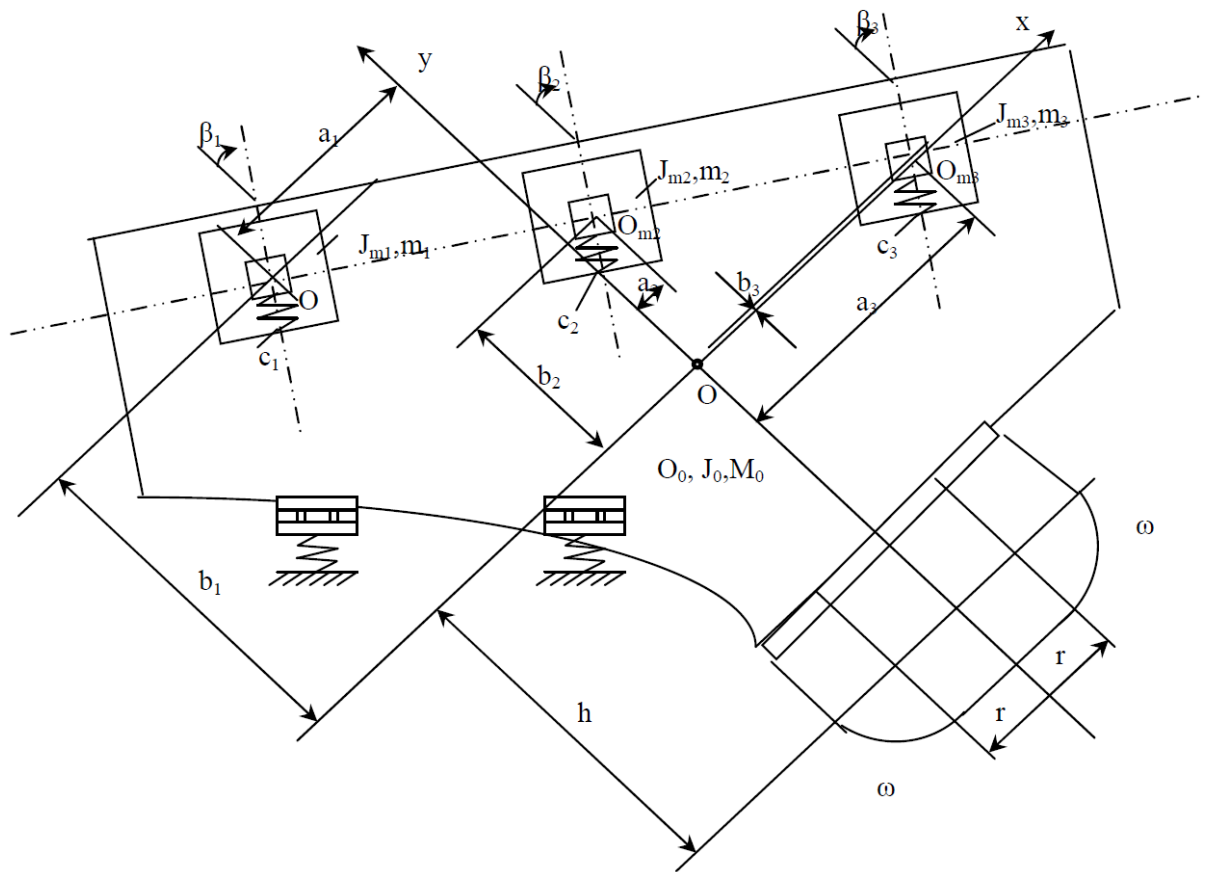


Рис. 2.2. Конструктивна схема вібраційного столу.

$$\begin{aligned}
 M\ddot{X} + \sum_{i=1}^n m_i \ddot{f}_i \sin \beta_i &= F_x, \\
 M\ddot{Y} + \sum_{i=1}^n m_i \ddot{f}_i \cos \beta_i &= F_y, \\
 I\ddot{\theta} + \sum_{i=1}^n m_i \ddot{f}_i \rho_i &= L, \\
 m \ddot{f}_i + m_i (\ddot{X} \sin \beta_i + \ddot{Y} \cos \beta_i + \rho_i \ddot{\theta}) + C_i f_i &= 0 \\
 (i = 1, n). &
 \end{aligned}
 \tag{2.44}$$

Тут F_x, F_y, L – проєкції відцентрової сили F на осі координат і її момент відносно початку координат, які виражаються наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned}
F_x &= 2F \cos \frac{\alpha}{2} \cos \omega t, \\
F_y &= 2F \sin \frac{\alpha}{2} \cos \omega t, \\
L &= 2F \left[\left(h \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{\Delta r}{2} \sin \frac{\alpha}{2} \right) \cos \omega t + r \cos \frac{\alpha}{2} \sin \omega t \right] \quad (2.45)
\end{aligned}$$

де $r = \frac{r_1 + r_2}{2}$; $\Delta r = r_2 - r_1$; r_1 ; r_2 – відстань від центрів обертання вібраторів до осі OY ; h – відстань від прямої, що з'єднує центри вібраторів, до осі OX .

Для більшості вібраційних машин з умови уніфікації вузлів характерні наступні додаткові співвідношення:

$$\begin{aligned}
m_1 &= m_2 = \dots = m_i = \dots = m_n \\
C_1 &= C_2 = \dots = C_i = \dots = C_n \\
\beta_1 &= \beta_2 = \dots = \beta_i = \dots = \beta_n
\end{aligned}$$

що дозволяє спростити вихідну систему рівнянь (2.45):

$$\begin{aligned}
M\ddot{X} + m \sin \beta \sum_{i=1}^n \ddot{f}_i &= F_x, \\
M\ddot{Y} + m \cos \beta \sum_{i=1}^n \ddot{f}_i &= F_y, \\
I\ddot{\theta} + m \sum_{i=1}^n \ddot{f}_i \rho_i &= L, \\
m\ddot{f}_i + m(\ddot{X} \sin \beta + \ddot{Y} \cos \beta + \rho_i \ddot{\theta}) + C f_i &= 0 \\
(i = 1, n). & \quad (2.46)
\end{aligned}$$

Рішення системи диференціальних рівнянь (2.46), що відповідає вимушеним коливанням пружних твердих тіл, може бути представлено у вигляді:

$$\begin{aligned}
X &= \frac{1}{Mw^2\Delta} \left[\begin{aligned} &nF_y M^* \sin \beta \cos \beta \left(1 + M^* \sum_{i=1}^n \eta_i^2 \right) - \\ &-F_x \left(1 + M^* \sum_{i=1}^n \eta_i^2 \right) \cdot (1 + n \cdot M^* \cdot \cos^2 \beta) + \\ &+ \frac{L}{\rho} M^* \sin \beta \sum_{i=1}^n \eta_i \end{aligned} \right], \\
Y &= \frac{1}{Mw^2\Delta} \left[\begin{aligned} &nF_x M^* \sin \beta \cos \beta \left(1 + M^* \sum_{i=1}^n \eta_i^2 \right) - \\ &-F_y \left(1 + M^* \sum_{i=1}^n \eta_i^2 \right) \cdot (1 + n \cdot M^* \cdot \sin^2 \beta) + \\ &+ \frac{L}{\rho} M^* \cos \beta \sum_{i=1}^n \eta_i \end{aligned} \right], \\
\theta &= \frac{1}{Mw^2\Delta} \left[nF_x \sin \beta + F_y \cos \beta \left(M^* \sum_{i=1}^n \eta_i^2 - \frac{L}{\rho} + nM^* \right) \right], \\
f_i &= \frac{1}{Mw^2\Delta \left(\frac{\lambda^2}{w^2} - 1 \right)} \left[\begin{aligned} &(F_x \sin \beta + F_y \cos \beta) \left(M^* \sum_{i=1}^n \eta_i^2 - 1 \right) + \\ &+ \frac{L}{\rho} \left(M^* \sum_{i=1}^n \eta_i - nM^* \sum_{i=1}^n \eta_i \right) \end{aligned} \right]. \quad (2.47)
\end{aligned}$$

де:

$$M^* = \frac{m}{M} \cdot \frac{1}{\left(\frac{\lambda^2}{w^2} - 1 \right)}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{C}{m}}$$

$$\eta_i = \frac{\rho_i}{\rho}$$

$$\rho = \sqrt{\frac{I}{M}}$$

Частоти ω_c власних коливань корпусу вібраційного столу знаходяться з рівняння:

$$1 + M^* \sum_{i=1}^n \eta_i^2 + n \cdot M^* + nM^{*2} \sum_{i=1}^n \eta_i^2 = 0 \quad (2.48)$$

та мають вигляд:

$$\begin{aligned} \omega_{c1} &= \sqrt{\frac{nc(M_0 + nm)}{nmM_0}}, \\ \omega_{c2} &= \sqrt{\frac{I(M_0 + nm)}{I(M_0 + nm) - nmM_0 \sum_{i=1}^n \rho_i^2}}, \end{aligned} \quad (2.49)$$

де ω_{c1} – частота поступальних коливань корпусу вібраційного столу; ω_{c2} – частота поворотних коливань корпусу (галоупування).

Експериментальні дослідження показали [78], що галоупування робочого органу вібраційних машин, а також відсутність самосинхронізації вібраторів на корпусі можуть привести до частих поломок. Для того, щоб конструкція робила чисто поступальні коливання необхідно, щоб $\theta = 0$ співвідношення:

$$\frac{1}{M\rho\omega^2\Delta} \left[(F_x M^* \sin \beta + F_y \cos \beta) M^* \sum_{i=1}^n \eta_i - \frac{L}{\rho} (1 + nM^*) \right] = 0 \quad (2.50)$$

На практиці шляхом правильного вибору значень параметрів системи можна забезпечити таку малість величини θ що викривлення поступальних коливань елементів системи через нерівності нулю θ будуть зневажливо малими.

Для самосінхронізації двох вібраторів, що обертаються в протилежних напрямках, необхідно, відповідно до [78], звести до мінімуму середнє

значення за період $\frac{2\pi}{\omega}$ функції Лагранжа $\mathfrak{L}(T - \Pi)$ що на практиці забезпечує стійкість руху вібраційної машини.

З огляду на співвідношення (2.43), функція Лангранжа приймає наступний вигляд:

$$\mathfrak{L}(T - \Pi) = -\frac{1}{2} \cdot \frac{F^2}{M\omega^2\Delta^2} (C \cos \alpha + S \sin \alpha) \quad (2.51)$$

де:

$$C = M^* \left[(M^* \sum_{i=1}^n \eta_i^2 + 1)^2 (1 - n(nM^* + 2)) - M^* \cdot (\sum_{i=1}^n \eta_i)^2 \times \right. \\ \left. (M^* \sum_{i=1}^n \eta_i^2 + 1) \right] \cos \beta + 2 \left(\frac{h}{\rho} \sin \beta + \frac{\Delta r}{2\rho} \cos \beta \right) \times (M^* \sum_{i=1}^n \eta_i + 1) \cdot (M^* + 1) - \frac{1}{\rho^2} \left[h^2 - \left(\frac{\Delta r}{2} \right)^2 + r^2 \right] \cdot [(nM^* + 1)^2 \times (M^* \sum_{i=1}^n \eta_i + 1) - M^{*2} (\sum_{i=1}^n \eta_i)^2 \cdot (2nM^* - M^* + 1)],$$

$$S = M^* \left[(M^* \sum_{i=1}^n \eta_i^2 + 1)^2 \cdot [1 - n(nM^* + 2)] - M^* \cdot (\sum_{i=1}^n \eta_i)^2 \times \right. \\ \left. (M^* \sum_{i=1}^n \eta_i^2 + 1) \right] \sin 2\beta + 2 \left(\frac{h}{\rho} \cos \beta + \frac{\Delta r}{2\rho} \sin \beta \right) \times (M^* \sum_{i=1}^n \eta_i + 1) \cdot (M^* + 1) - \frac{h\Delta r}{\rho^2} [(nM^* + 1)^2 (M^* \sum_{i=1}^n \eta_i^2 + 1) - M^{*2} (\sum_{i=1}^n \eta_i)^2 (2nM^* - M^* + 1)].$$

Перша похідна від функції Лагранжа по змінній α має вигляд:

$$\frac{\partial \mathfrak{L}(T - \Pi)}{\partial \alpha} = \frac{1}{2} \frac{F^2}{M\omega^2\Delta^2} (C \sin \alpha - S \cos \alpha) \quad (2.52)$$

Різниця фаз α , відповідні можливим синхронним рухам, знаходяться з трансцендентного рівняння:

$$C \sin \alpha - S \cos \alpha = 0 \quad (2.53)$$

Значення величини кута зсуву по фазі визначається за формулою:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{S}{C} \quad (2.54)$$

Виходячи з габаритів заготовок, застосовуваних під час проведення експерименту, були обрані основні параметри вібраційного столу, представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Основні параметри вібраційного столу.

Параметр	Значення
Тип вібрації:	радіальна
Маса об'єкта обробки (f), кг	до 50
Загальна маса конструкції (m), кг	15,4
Вага рухомих елементів конструкції (m_{pn}), кг	12,5
Максимальний кінетичний момент дебалансів (M), Н·см	5000
Амплітуда коливань, мм	0,5
Розмір робочої поверхні вібростолу, м	0,750x0,800
Матеріал фундаменту вібростолу	ДСП

Однією з основних складових конструкції вібростолу є віброопори. Вони призначені для компенсації та ізоляції вібрації. Вони забезпечують зниження ударних навантажень, компенсацію навантажень на розтяг і дефекту виготовлення вузла.

Для виготовлення вібраційного столу в першу чергу необхідно розрахувати його віброізоляцію. Виникає завдання забезпечення

витримування допустимих параметрів вібрації робочих місць. В даному розрахунку (рис. 2.3) наведемо приклад пружинних і гумових амортизаторів, дослідивши параметри яких, виберемо підходящий варіант віброопор [79].

За першим варіантом було зроблено розрахунок з використанням пружинних віброопор. Визначимо динамічну силу, створювану дебалансним вібратором:

$$F = \frac{M\omega^2}{g} = 5000 \cdot \frac{(2 \cdot 3,14 \cdot 50)^2}{981} = 502528(H) \quad (2.55)$$

де $\omega = 2\pi f$ - кругова частота вібратора, c^{-1} .

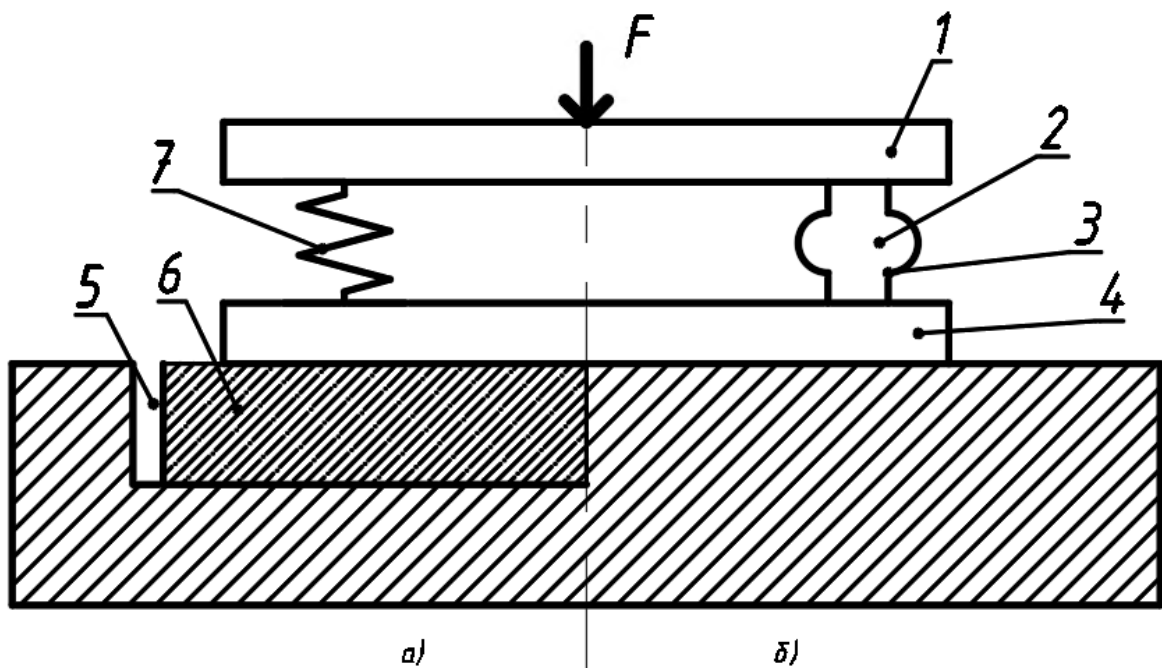


Рис. 2.3. Схема вібростолу з пружинними віброопорами (а) і гумовими амортизаторами (б): 1 – рухома частина вібраційного столу; 2 – камера гумового амортизатора; 3 – гумово-кордова оболонка гумового амортизатора; 4 – нерухома частина (основа); 5 – акустичний шов; 6 – віброгасильна основа (фундамент); 7 – пружинний віброізолятор.

Загальна жорсткість пружинних віброопор з урахуванням статичної деформації $\lambda_{\text{ст}} = 0,5$ см визначається наступним чином:

$$K = \frac{Q_{\text{р.ч.}}}{\lambda_{\text{ст}}} = \frac{12,5 \cdot 9,81}{0,005} = 24525 \text{ Н/м} \quad (2.56)$$

Власна частота коливань віброопори:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \sqrt{\frac{24525}{12,5}} = 7,02 \text{ Гц} \quad (2.57)$$

Коефіцієнт передачі розрахуємо за формулою:

$$\mu = \frac{1}{\left(\frac{f}{f_0}\right)^2 - 1} = \frac{1}{\left(\frac{50}{7,02}\right)^2 - 1} = \frac{1}{49} \quad (2.58)$$

Динамічна сила, що передається на основу:

$$F_0 = F \cdot \mu = \frac{502528}{49} = 10256 \text{ Н} \quad (2.59)$$

Площа основи віброплощадки $0,800 \times 0,750 = 0,6 \text{ м}^2$.

Маса основи:

$$m_0 = m - m_{\text{рн}} = 15,4 - 12,5 = 2,9 \text{ кг} \quad (2.60)$$

Коефіцієнт жорсткості основи по заданому допустимому нормативному тиску $c_z = 400000 \text{ Н/м}^3$ дорівнює:

$$K_0 = S_0 \cdot c_z = 0,6 \cdot 400000 = 240000 \text{ Н/м} \quad (2.61)$$

Власна частота коливань основи віброплощини визначається за формулою:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_0}{m_0}} = \frac{1}{6,28} \sqrt{\frac{240000}{2,9}} = 45,34 \text{ Гц} \quad (2.62)$$

Проведемо другий варіант розрахунку з використанням гумових віброопор.

Загальна жорсткість гумових віброопор з урахуванням статичної деформації $\lambda_{\text{ст}} = 0,5 \text{ см}$ визначається наступним чином:

$$K = \frac{Q_{\text{р.ч.}}}{\lambda_{\text{ст}}} = \frac{12,5 \cdot 9,81}{0,008} = 15328,125 \text{ Н/м} \quad (2.63)$$

Власна частота коливань віброопори:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \sqrt{\frac{15328,125}{12,5}} = 5,57 \text{ Гц} \quad (2.64)$$

Коефіцієнт передачі розрахуємо за формулою:

$$\mu = \frac{1}{\left(\frac{f}{f_0}\right)^2 - 1} = \frac{1}{\left(\frac{50}{5,57}\right)^2 - 1} = \frac{1}{81} \quad (2.65)$$

Динамічна сила, що передається на основу:

$$F_0 = F \cdot \mu = \frac{502528}{81} = 6021,05 \text{ Н} \quad (2.66)$$

Визначимо власну частоту коливань вібраційного стола:

$$f_0 = \frac{S_0}{2\pi} \sqrt{\frac{h \cdot c_z}{m_{\text{рн}} \cdot V}} = \frac{0,6}{6.28} \sqrt{\frac{1.4 \cdot 400000}{12,5 \cdot 0.4}} = 32,48 \text{ Гц} \quad (2.67)$$

Тут h , V – висота і об'єм віброплатформи.

Порівнюючи розглянуті варіанти розрахунку пружинних і гумових віброопор, можна прийти до висновку, що використання обох типів опор є прийнятним і лежить в рамках, що не перевищують допустимий показник. Проте, гумові віброопори є більш ефективними, так як коефіцієнт передачі пружинних віброопор становить $1/49$, в той час як гумових – $1/81$. Таким чином, можна підвищити економію процесу, не роблячи зайвих витрат на дороге і складне виготовлення фундаменту.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Досліджено експериментальні дані про різні варіанти застосування вібраційної обробки в процесах виробництва зварних труб, пресування, волочіння, виробництва безперервнолитих зливків. Найбільш перспективним методом, з точки зору зняття залишкових напружень, є застосування вібрації безпосередньо в процесі зварювання трубної заготовки.

2. Розроблена формула тривалості вібраційного впливу на метал зварного шва, що дозволяє враховувати швидкість охолодження металу в зварювальній ванні.

3. Розроблено математичну модель вібраційної обробки матеріалу при зварюванні, що дозволяє визначати рівень залишкових напружень з урахуванням власної частоти вібрації, логарифмічного декременту загасання коливань, амплітуди і частоти сили, що вимушує, тривалості впливу вібрації.

4. Розроблено динамічну і конструкційну модель вібраційного столу, в основу якого покладено раціональний вибір електровібратора і розташування електродвигуна, що дозволило отримати в досліджуваному зразку рівномірні по всій довжині робочої зони і синусоїдально змінні вібраційні коливання. Також для виготовлення вібраційного столу розраховані елементи його віброізоляції.

5. Матеріали другого розділу опубліковані в роботах [80-86].

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІБРАЦІЇ НА ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ ПРИ ЗВАРЮВАННЯ ТРУБ ПЛАВЛІННЯМ

3.1. Експериментальне дослідження вимірювання залишкових напружень методом рентгенівської дифрактометрії

В даний час обсяг світового споживання трубної продукції становить понад 107 млн. т., з яких понад 60% займають зварні труби: труби великого діаметру (ТВД – діаметром 530 мм і більше), труби середніх (114 - 529 мм) і малих діаметрів (менше 114 мм) [87,88].

За останні 10-15 років провідними зарубіжними фірмами Німеччини, Японії, Австрії, Італії створені ТЕЗА для виробництва труб діаметром до 630 мм з товщиною стінки до 22 мм з металу категорії міцності до X80 з використанням високочастотного зварювання, які застосовуються в нафтогазовій промисловості [87, 88], а також в спеціальних видах техніки [89].

В останні десятиліття динамічно розвивається трубопровідний транспорт: в 2005 році його протяжність досягла 2 млн. км, в тому числі протяжність нафтопроводів наближається до 500 тис. км. З цієї мережі щорічно прокачується більше 2 млрд. т. нафти і нафтопродуктів. Є численні проекти будівництва нових трубопроводів в світі для транспортування нафти і газу [87,88,90].

У зарубіжній і вітчизняній практиці для будівництва сухопутних і підводних морських ділянок трубопроводів переважно застосовуються зварні одношовні труби діаметром 1220 і 1420 мм товщиною стінки від 7,0 до 48 мм, виробництво яких здійснюється із застосуванням формовки листової заготовки на пресах за схемами UOE і JUOE (JCO) або формуванням в вальцах [88] з наступними операціями зварювання і калібрування (рис.3.1). На кожен операцію технологічного процесу виробництва в зварних трубах відзначається поява залишкових напружень $\sigma_{\text{зал}}$, оскільки процеси пластичної формозміни відбуваються в холодному стані.

Слід зауважити, що в останні роки питанню розподілу залишкових напружень в зварних трубах приділяється велика увага, оскільки як в процесі виготовлення, так і при експлуатації виробів, виготовлених з труб, однією з причин їх руйнування, на думку авторів робіт [88,90], є саме залишкові напруження. Тому, наприклад, в зварних трубах малого діаметра, які застосовуються в енергетиці, величина $\sigma_{\text{зал}}$ регламентується на стадії їх виготовлення (ТУ 14-ЗР-19702001. Технічні умови. Труби безшовні з корозійностійких марок сталі з підвищеною якістю поверхні).

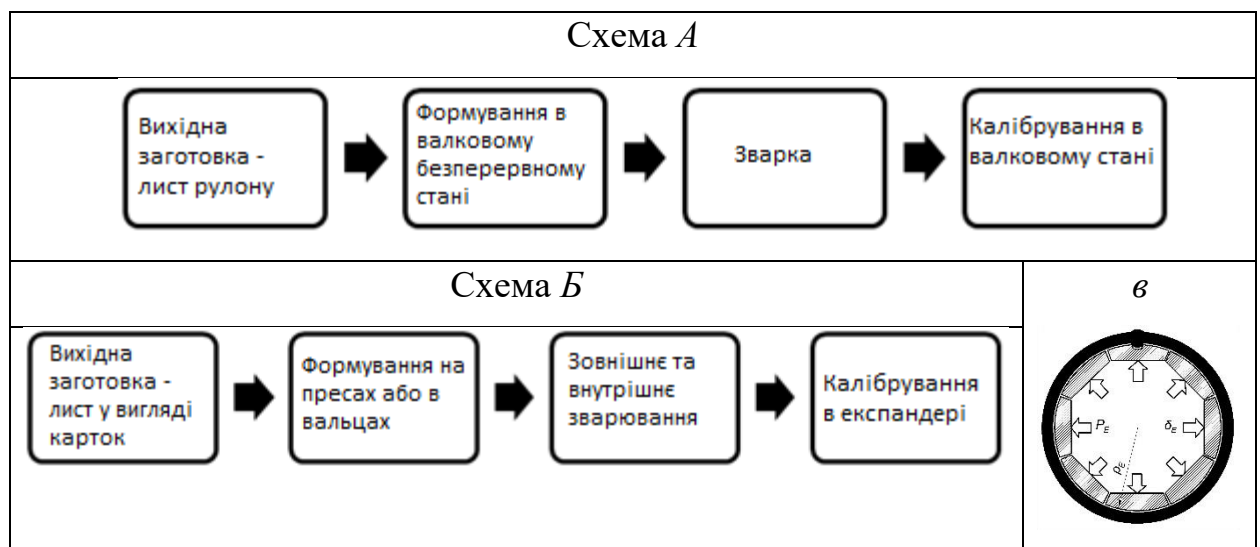


Рис. 3.1. Технологічні операції виробництва зварних труб малого, середнього (А) і великого (Б) діаметрів і схема калібрування ТБД в механічному експандері (в).

З позицій механіки дано аналіз напружено-деформованого стану формуємої листової заготовки, з якого випливає, що після зняття навантаження відбувається її пружинне розкриття і на зовнішній поверхні з'являються стискаючі залишкові напруження $-\sigma_\theta$, а на внутрішній поверхні – розтягуючі напруження $+\sigma_\theta$ (рис. 2) [92,93].

Однак, відповідно до аналітичного аналізу, виконаного Ю.М. Матвеевим [93] при формуванні трубної заготовки, було показано, що під дією зусилля P метал зазнає пружно-пластичну деформацію: зовнішні шари металу при згинанні відчувають розтягнення, а внутрішні – стиснення (см. рис. 3.2).

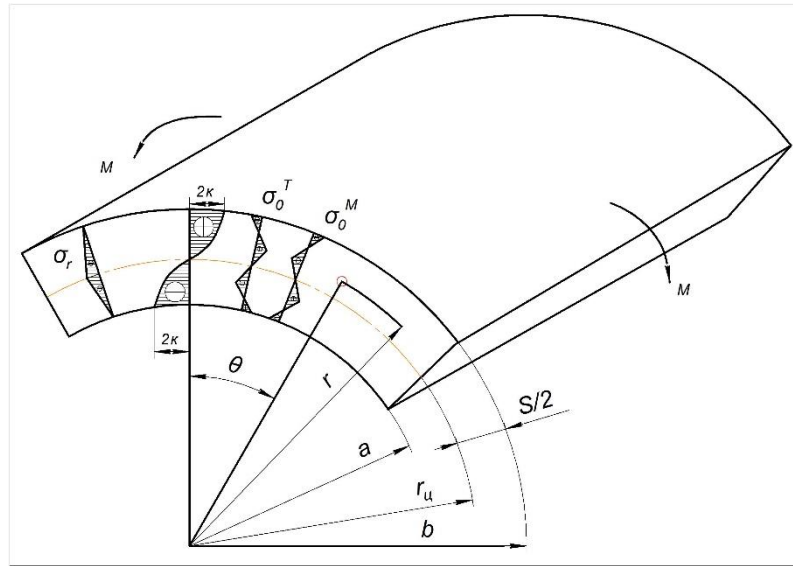


Рис. 3.2. Схема формування листової заготовки та епюри розподілу напружень по товщині листа

У зв'язку з цим, важливим є проведення експериментальних досліджень, які дозволять встановити характер розподілу залишкових напружень в формуємій трубній заготовці із застосуванням сучасних неруйнівних методів [94].

Відомо, що процес формування листової заготовки супроводжується неоднорідністю розподілу напружень і диференціальне рівняння рівноваги елемента, виділеного в осередку деформації (рис. 3.2), має вигляд [91]:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} \quad (3.1)$$

А рівняння пластичності за гіпотезою максимальних дотичних напружень для плоского деформованого стану можна записати у вигляді:

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = \pm \sigma_s, \quad (3.2)$$

де знак плюс належить до зони розтягування в тангенціальному напрямку, знак мінус – в зоні стиснення.

При спільному вирішенні цих рівнянь і з урахуванням граничних умов: $\sigma_r = 0$ при $r = a$ і $r = b$; $\sigma_z = 0,5(\sigma_r + \sigma_\theta)$ А. Д. Томленовим [91] отримані формули розподілу напружень по товщині листа для чистого вигину (див. рис.3.2), представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Формули розподілу напружень по товщині листа.

для зони розтягування в зовнішньому шарі $\sigma_\theta - \sigma_r = 2k = \sigma_s$		
$\sigma_r = \sigma_s \ln \frac{r}{b}$	$\sigma_\theta = \sigma_s \left(1 + \ln \frac{r}{b} \right)$	$\sigma_z = \sigma_s \left(0,5 + \ln \frac{r}{b} \right)$
для зони стиснення $\sigma_\theta - \sigma_r = -2k = -\sigma_s$		
$\sigma_r = -\sigma_s \ln \frac{r}{a}$	$\sigma_\theta = -\sigma_s \left(1 + \ln \frac{r}{a} \right)$	$\sigma_z = -\sigma_s \left(0,5 + \ln \frac{r}{b} \right)$

При знятті зовнішнього навантаження відбувається пружне розкриття листової заготовки під дією залишкових напружень, епюра яких показана на рис. 3.2, і згідно з розрахунками А. Д. Томленова [91], який розглядав деформацію бруса при пружно-пластичному вигині, в зовнішньому шарі напруження розтягу $+\sigma_\theta$ змінилися на стискаючи $-\sigma_\theta^r$. Однак ще в 1965 р Ю. М. Матвєєв [93] представив реальну епюру залишкових напружень в листовій заготовці після зняття навантаження, згідно з якою в зовнішньому шарі діють напруження розтягу $+\sigma_\theta^m$ (рис. 3.3).

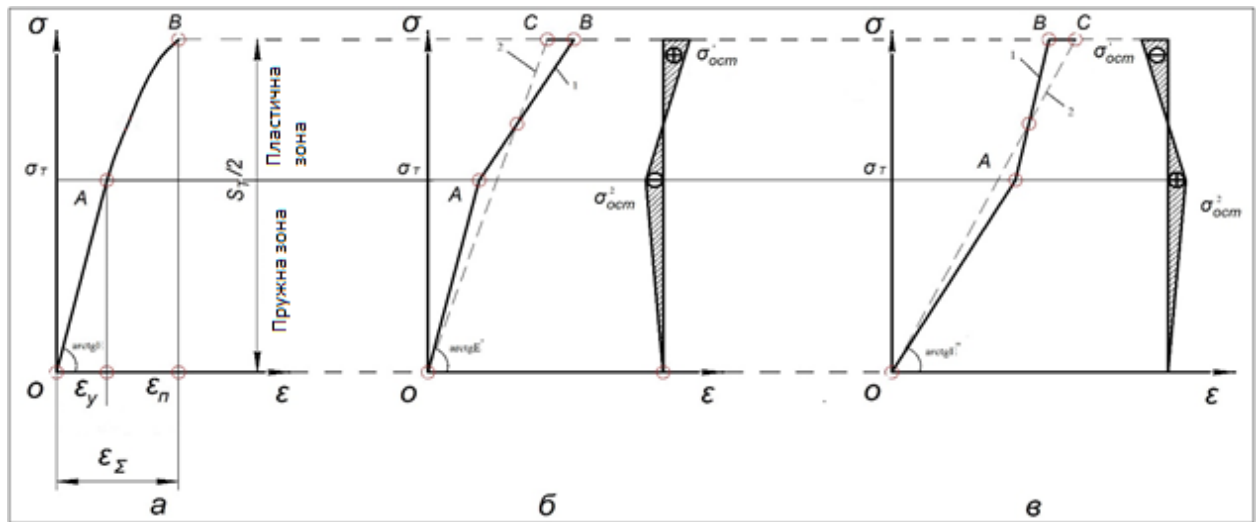


Рис. 3.3. Епюри розподілу напружень при розтягуванні зразка: *а* – реального металу $\sigma - \epsilon$; *б* - в моделі, прийнятій в роботі [93]; *в* - в моделі, прийнятій в роботі [91]; лінії *OAB-1* – навантаження і *OC-2* – розвантаження.

Розглянемо розтягнення стандартного зразка та криву $\sigma - \epsilon$ реального металу листової заготовки, формування якої відбувається в області пружно-пластичної деформації в т. В (рис.3.3). Величину σ_s зміцнення заготовки, що деформується, зі ступенем деформації $\epsilon_{пл}$ в т. В можна визначити за графіком кривої 2-го порядку за формулою [95]:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_B}{(1 - \psi_{ш})^2} (1 - 2\psi_{ш} + \psi), \quad (3.3)$$

Різниця в прийнятих моделях пружно-пластичної деформації Ю.М. Матвєєва та А.Д. Томленова призводить до різних схем розподілу залишкових напружень по товщині сформованої листової заготовки, оскільки як в одному, так і в іншому випадку величина залишкових напружень визначається як різниця між розтягуючими напруженнями в т. В прийнятій в моделі і стискаючими напруженнями в т. С. З цього випливає, що в моделі Ю. М. Матвєєва $\sigma_o = + \sigma_B - (- \sigma_c) > 0$ оскільки $|\sigma_B| > |\sigma_c|$, а в моделі А. Д. Томленова $\sigma_o = + \sigma_B - (- \sigma_c) < 0$ оскільки $|\sigma_B|$ так як $|\sigma_B| < |\sigma_c|$, що добре показано на рис. 3.3.

В рамках роботи над даною дисертаційною роботою проведені експериментальні дослідження з вимірювання залишкових напружень в різних точках по колу зовнішньої поверхні труб портативним рентгенівським дифрактометром «ДРП-РИКОР», робота якого заснована на методі рентгенівської дифрактометрії [94].

На рис. 3.4 представлені загальний вигляд приладу «ДРП-РИКОР» і схема вимірювання залишкових напружень на зразках, взятих від труб після зварювання, калібрування і термічної обробки. Підготовка зразків для проведення експериментальних досліджень включала травлення кислотою (50% HCl та 10% FeCl₃) і промивку слабким розчином харчової соди.

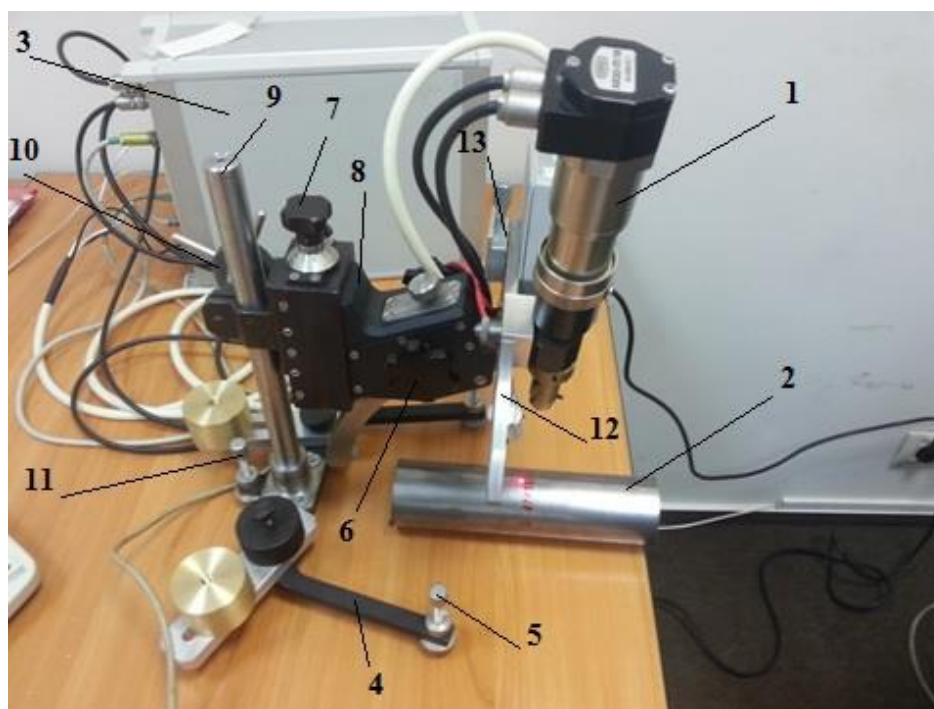


Рис. 3.4. Загальний вигляд приладу «ДРП-РИКОР» і підготовлений зразок труби для вимірювання залишкових напружень: 1 – рентгенівська трубка в кожусі; 2 – зразок; 3 – блок живлення і електроніки; 4 – скоба-основа; 5 – регулювальні гвинти скоби-основи; 6 – рукоятка нахилу несучої дуги; 7 – рукоятка точного регулювання висоти; 8 – кронштейн; 9 – міні-штатив; 10 – рукоятка грубого регулювання висоти; 11 – регулювальні гвинти скоби-основи; 12 – несуча дуга; 13 – детектор.

Результати вимірювання залишкових напружень на поверхні зварних труб з нержавіючої сталі типорозміру $D_T \times S_T = 40 \times 1,2$ мм після зварювання ТВЧ і після калібрувального стану в зоні зварного шва і на певній відстані від зварного шва представлені в таблиці 3.2, а труб розміром $D_T \times S_T = 52 \times 2,5$ мм зі сталі 09Г2С - після зварювання ТВЧ та після калібрування і термічної обробки в таблиці 3.3.

Таблиця 3.2. Результати вимірювання залишкових напружень на трубах типорозміру $D_T \times S_T = 40 \times 1,2$ мм з нержавіючої сталі.

Залишкові напруження, МПа		
Точки вимірювання – відстань до зварного шва.	Труба після зварювання	Труба після калібрувального стану
т.0 – в зварному шві	+145	+205
т.1 – 10 мм від зварного шву	+70	+145
т.2 – при повороті на 90° від зварного шва	+210	+130
т.3 – при повороті на 180° від зварного шва	----	+130

Аналіз експериментальних даних (табл. 3.2, 3.3) переконливо показує, що в зварних трубах малого типорозміру при формуванні, зварюванні і калібруванні на зовнішній поверхні спостерігаються напруження розтягу, тоді як в вихідному холоднокатаному листі з нержавіючої сталі по ширині відзначені тільки стискаючі напруження в інтервалі $\sigma_{\text{зал}}^{\text{лист}} = 150 - 120$ МПа і сталі 09Г2С – $\sigma_{\text{зал}}^{\text{лист}} = 30 - 60$ МПа.

Таблиця 3.3. Результати вимірювання залишкових напружень на трубах
типорозміру $D_T \times S_T = 52 \times 2,5$ мм зі сталі 09Г2С.

Залишкові напруження, МПа		
Точки вимірювання – відстань до зварного шва	Труба після калібрувального стана	Труба після термічної обробки
т.1 – в зварному шві	+245	– 30
т.2- 5 мм від зварного шву	+140	+30
т.3- 15 мм від зварного шву	+70	+35
т.4- 20 мм від зварного шву	+55	+35
т.5- 25 мм від зварного шву	+55	+30
т.6- 30 мм від зварного шву	+90	+30
т.7- при повороті на 90° від зварного шва	+75	+30

З труб великого діаметра, виготовлених за різними схемами формування зі сталі 10Г2ФБЮ категорії міцності К60 були взяті фрагменти-зразки та проведені заміри по цій же методиці [94] (табл.3.4). Слід зазначити, що труби діаметром 1420 мм були виготовлені за схемою JOE, а труби діаметром 1020 мм – за схемою UOE [87], однак всі вони пройшли операцію калібрування-роздачі по діаметру на механічному експандері. Особливість процесу калібрування ТВД полягає в тому, що зварний шов розташовується у вертикальній площині так, що він (зварний шов) не повинен піддаватися деформації, як показано на рис.3.1, в. Таким чином, в звареному шві зберігаються залишкові напруження, отримані під час зварювання, а на інших

ділянках труби розтягуючи напруження $+\sigma_{\text{зал}}$ частково знімаються і переходять в стискаючи $-\sigma_{\text{зал}}$ в результаті експандування.

Таблиця 3.4. Експериментальні значення тангенціальних залишкових напружень на зразках труб великого діаметру зі сталі 10Г2ФБЮ.

Типорозмір труби $D_T \times S_T = 1420 \times 12$ мм		Типорозмір труби $D_T \times S_T = 1020 \times 26$ мм	
Відстань до зварного шва	Залишкові напруження, МПа	Відстань до зварного шва	Залишкові напруження, МПа
Центр зварного шва	+220	Центр зварного шва	+150
т.2 на відстані 24 мм	-40	т. 2	+45
т.4 – 37 мм	-70	т 4	- 90
т. 5 – 50 мм	-70	т 5	- 100
т .6 – 79 мм	-75	----	----

На другому етапі було проведено експериментальні дослідження осьових і тангенціальних залишкових напружень в середині і на кінці прямошовної труби великого діаметра (табл. 3.5).

Дані дослідження підтвердили наявність розтягуючих залишкових напружень, які можуть бути небезпечними і викликати появу різних дефектів, що сприяють втомному руйнуванню металу при подальшій експлуатації трубопроводу [90]. При цьому, як зазначає Л. І. Ефрон [90], при тривалій експлуатації трубопроводів можливе руйнування навіть при напруженні, що не перевищують максимально допустимі в результаті дії всіх навантажень на поверхню труб, включаючи зварювальні напруження і залишкові напруження, що виникають в процесі виготовлення труб [90].

Таблиця. 3.5. Розподіл залишкових напружень в поперечних перетинах.

Типорозмір труби $D_T \times S_T = 1020 \times 26$ мм зі сталі 10Г2ФБЮ.

Точки вимірювання $\sigma_{\text{зал}}$	Залишкові напруження в поперечному перетині, МПа			
	В середині труби		На кінці труби	
	Осьові	Тангенціальні	Осьові	Тангенціальні
т.1 – в районі зварного шва	+12	– 5	+50	– 25
т.2 – при повороті на 90° від зварного шва	+80	+40	– 20	– 25
т.3 – при повороті на 180° від зварного шва	+5	– 60	+14	– 5

Отримані результати переконливо підтверджують висновок Ю. М. Матвєєва про наявність напружень, що розтягують на поверхні зварних труб, які з'являються як в зварному шві, так і в металі сформованої листової заготовки як в тангенціальному, так і в осьовому напрямках. Такі дослідження є актуальними для прогнозування руйнування нафтогазопровідних ТВД в процесі експлуатації, а також при виборі труб малого діаметра для застосування в спеціальних галузях техніки.

3.2. Розробка лабораторної установки для вібраційної обробки зразків трубних заготовок

На основі розрахунків, наведених у другому розділі даної дисертації розроблений та сконструйований вібраційний стіл для експериментальної обробки зразків трубних заготовок згідно з наведеними вище теоретичними дослідженнями. За допомогою побудови математичних моделей було

знайдено оптимальне розташування вібраційної установки щодо вібростолу і проведений раціональний вибір віброопор.

У конструкції вібростолу використовується вібратор майданчиковий електромеханічний моделі ЕВ-1000, призначення якого – створення періодичних осциляцій. Принцип дії даного приладу заснований на перетворенні підведеної електричної енергії в енергію механічних коливань – вібрацію.

Вібратори майданчикові електромеханічний ЕВ-1000 являє собою асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором і встановленими на кінцях валу дебалансами. Його конструкція забезпечує вібростійкість обмотки статора і механічну міцність вала ротора, підшипникового вузла і корпусних деталей. Статор електродвигуна вбудований в алюмінієвий литий корпус з коробкою відводів і посиленими елементами кріплення до вібромеханізму.

Регулювання сили, що змушує і амплітуди коливань здійснюється зміною взаємного розташування дебалансів. При обертанні ротора електродвигуна виникають кругові коливання вібратора і приєднаних до нього деталей і елементів. На рис. 3.4 зображені всі елементи вібраційного столу в зборі.

Вібратор виконаний для роботи від мережі змінного струму зі стандартною напругою 220 В частоти 50 Гц.

Параметри двигуна:

- потужність 0,9 кВт;
- частота обертання 1 – 1500 об/хв;
- сила, що змушує – 1765 Н;
- маса 12,5 кг.

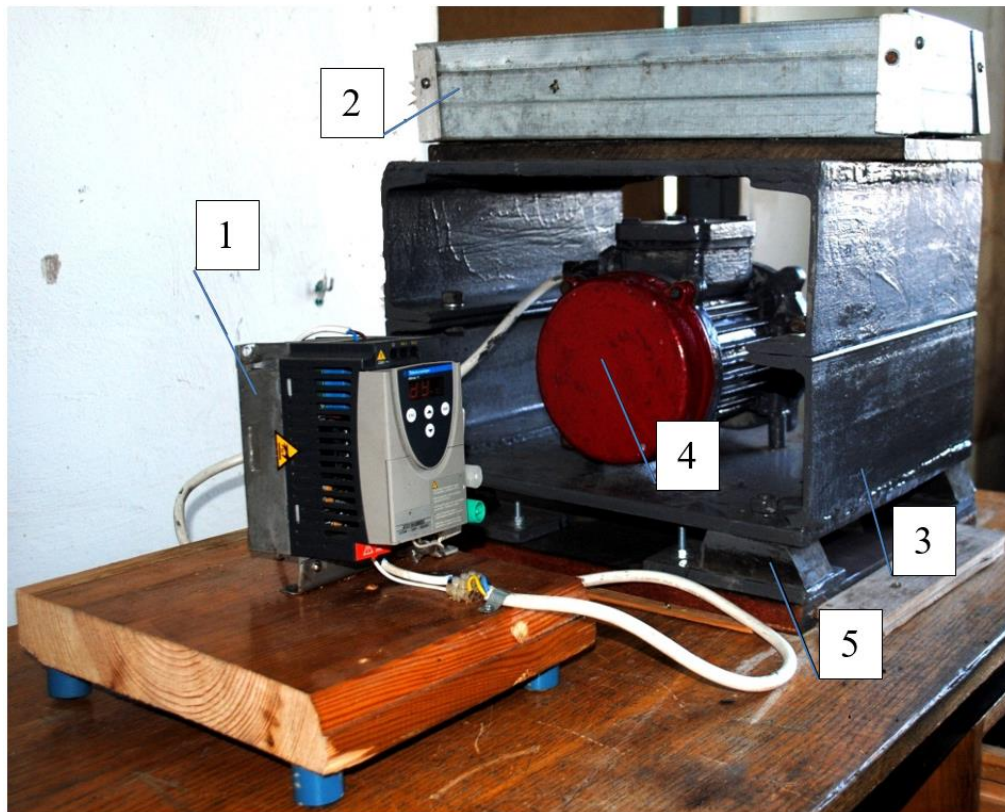


Рис. 3.4. Вібраційний стіл: 1 – перетворювач частоти; 2 – робоча поверхня вібростолу; 3 – рама вібростолу; 4 – двигун; 5 – віброопори.

На рис. 3.5 зображена принципова схема роботи вібраційного столу. Вібратор, що збуджує кругові коливання, складається з вала 1, що приводиться в обертання безпосередньо за допомогою електродвигуна, закріплених на валу ексцентриків 2, які називаються дебалансами, і корпусу вібратора 3, який кріпиться до внутрішньої поверхні вібраційного столу 4, на робочій поверхні якого закріплений зразок, що обробляється 5.

При обертанні вала 1 з ексцентриком-дебалансом 2 виникає змушуюча сила, рівна відцентрової сили дебаланса. Змушуюча сила, при схемі, що описана, за кожен оберт вала 1 змінює періодично свій напрямок на 360° , а величина її вертикальної складової змінюється за синусоїдальним законом.

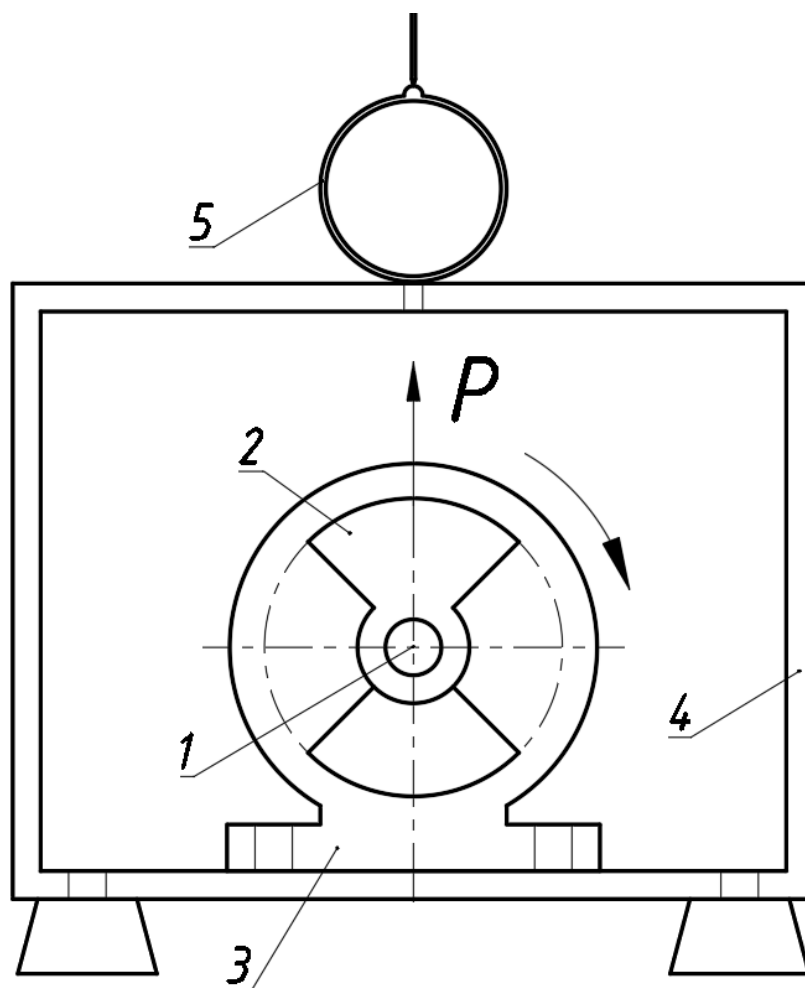


Рис. 3.5. Принципова схема роботи вібраційного столу.

Напрямок коливань такого вібратора змінюється відповідно напрямку вимушених коливань, і, отже, переміщення центру ваги вібратора при коливаннях буде відбуватися як у вертикальному, так і в горизонтальному напрямках, а траєкторія його буде близькою до кола з діаметром, рівним амплітуді коливань. Такі коливання вібраторів називаються круговими.

При необхідності змінювати величину вимушених коливань в широких межах (регульовані вібратори) на валу вібратора закріплюються два однакових дебаланса, причому кут між ними зазвичай може регулюватися в межах від 0 до 180°. Змушуюча сила дорівнює геометричній сумі відцентрових сил дебалансів, і неважко бачити, що при зміні кута від 0 до 180° змушуюча сила змінює свою величину від максимального значення $2P$ до мінімального.

На рис. 3.6 представлений вид збоку вібраційного столу зі знятим кожухом електровібратора. Можна бачити відкриті частини ексцентрикового дисбалансу, закріплені на осі валу різьбових з'єднань.

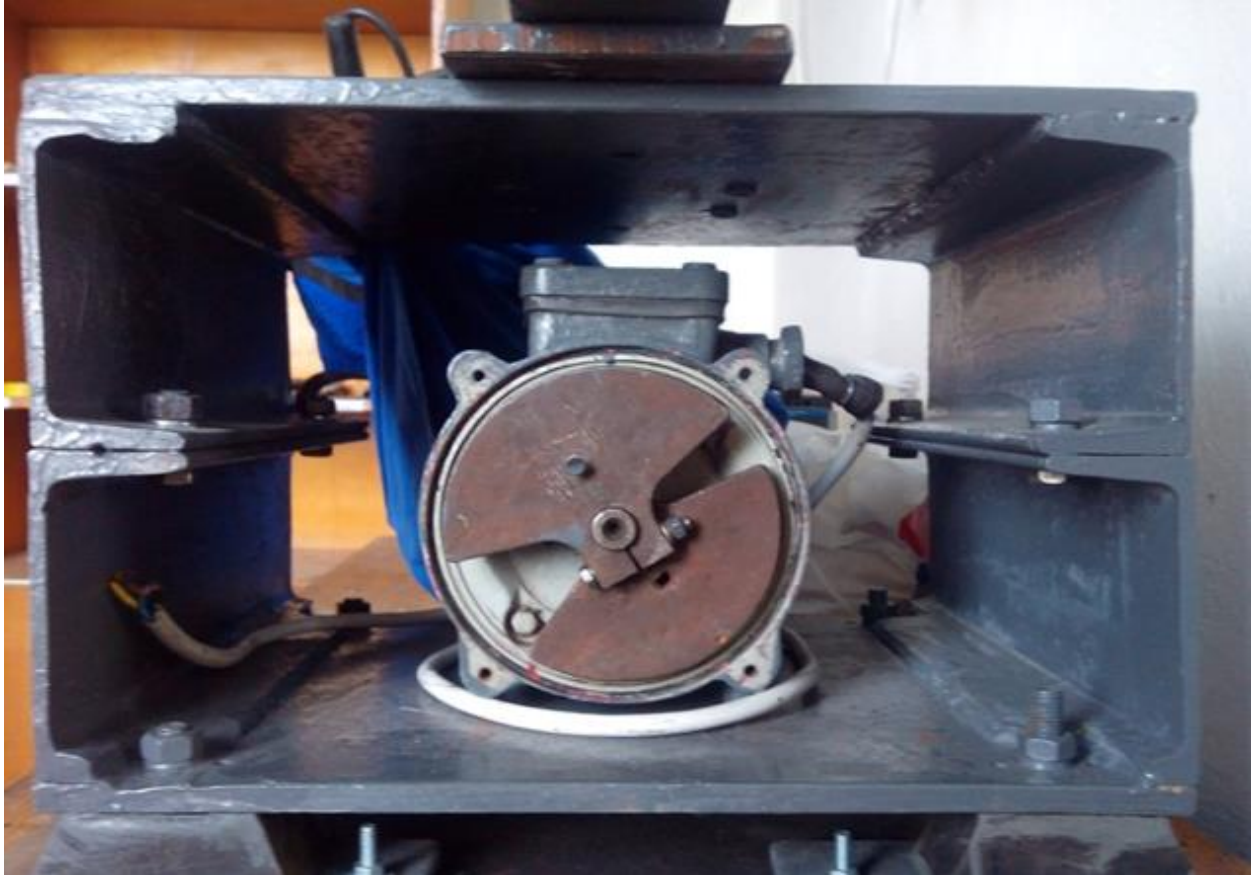


Рис. 3.6. Вібраційний стіл, вид збоку.

Конструкція вібростолу виконана зі сталі з горизонтально з'єднаними між собою швелерами, що збільшують жорсткість конструкції. З'єднання вироблено методом зварки. У центрі конструкції станини жорстко закріплений електровібратор. Конструкція встановлена на чотирьох гумових віброопорах, що забезпечує віброізоляцію, розраховану у другому розділі даної дисертації. У верхній частині конструкції розташована робоча поверхня вібростолу для закріплення зразків за допомогою болтового з'єднання. Регулювання частоти обертання електродвигуна виробляється за допомогою перетворювача частоти.

Частотний асинхронний перетворювач частоти служить для перетворення мережевого трифазного або однофазного змінного струму частотою 50 (60) Гц в трифазний або однофазний струм, частотою від 1 Гц до 200 Гц.

При проектуванні лабораторної установки використаний перетворювач електронного типу, що дозволяє плавно регулювати швидкість двигуна за рахунок створення на виході перетворювача електричної напруги заданої частоти. Регулювання частоти і напруги відбувається відповідно до заданої характеристикою V/f .

Частотний перетворювач електронного типу складається з: випрямляча (моста постійного струму), що перетворює змінний струм промислової частоти в постійний, і інвертора (перетворювача) (іноді з широтно-імпульсною модуляцією), що перетворює постійний струм в змінний необхідної частоти і амплітуди. Вихідні тиристори або транзистори забезпечують необхідний струм для живлення електродвигуна.

3.3 Методика визначення залишкових напружень з використанням методу магнітної пам'яті металу

У даній роботі проводилися вимірювання зразків на наявність в них залишкових напружень за допомогою приладу вимірювання концентрації напружень моделі ІКН-1М-4. Блок-схема приладу представлена на рис. 3.7.

ІКН - система вимірювання, реєстрації та обробки даних діагностики напружено-деформованого стану обладнання та конструкцій з використанням методу магнітної пам'яті металу. За принципом роботи вони є спеціалізованими багатоканальними ферозондовими магнітометрами. Напруженість магнітного поля розсіяння H_p на шкалах приладів проградуйована в А/м (Ампер/метр). Довжина реєстрованого переміщення датчика проградуйована в мм (міліметрах).

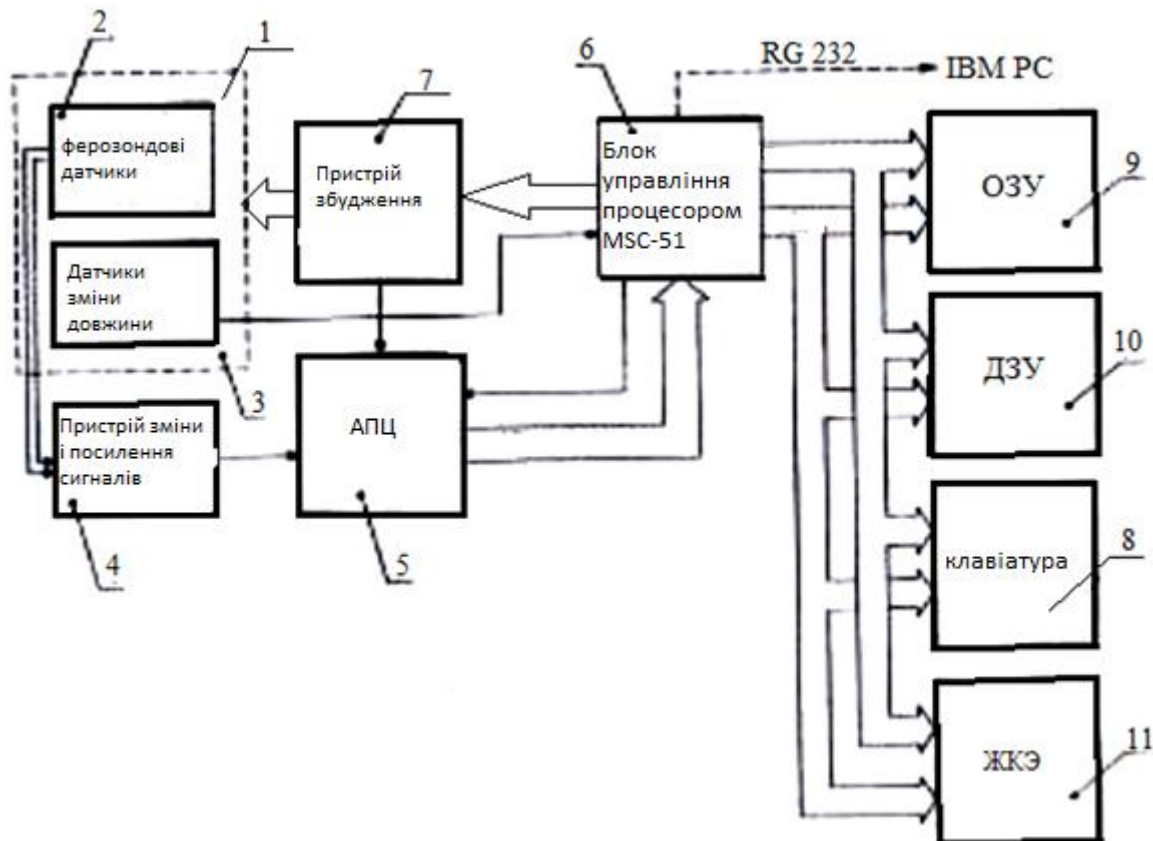


Рис. 3.7. Блок-схема приладу ІКН: 1 – скануючий пристрій; 2 – ферозондові датчики; 3 – датчик вимірювання довжини; 4 – пристрій вимірювання та посилення сигналів; 5 – аналого-цифровий перетворювач; 6 – блок управління (процесор); 7 – пристрій, що збуджує; 8 – клавіатура; 9 – оперативно-запам'ятовуючий пристрій; 10 – довготривало-запам'ятовуючий пристрій; 11 – рідкокристалічний екран.

Принцип дії приладів заснований на вимірюванні зміни характеристики магнітного стану ферозондового перетворювача при впливі на нього зовнішнього магнітного поля. За величиною і характером зміни нормальної складової вектора напруженості магнітного поля розсіювання (H_p), що вимірюється приладом над поверхнею контрольованих об'єктів, за допомогою програмного забезпечення оцінюються напружено-деформований стан обладнання, структурні зміни металу і виявляються поверхневі і підповерхневі дефекти. Зв'язок між розподілом поля H_p , зонами концентрації напружень і конкретними дефектами встановлюється за допомогою програмного

забезпечення, в основі якого лежить методологія порівняння декількох потоків інформації.

Прилади магнітометричні для визначення концентрації напружень «ІКН» представляють собою портативні вимірювальні прилади, що включають: вимірювач концентрації напружень ІКН і вимірювальний датчик. Вимірювач концентрації напружень ІКН і вимірювальний датчик з'єднуються між собою за допомогою гнучкого багатожильного електричного кабелю, по якому здійснюється управління і обмін інформацією між пристроями. Вимірювач концентрації напружень ІКН включає в себе інтерфейсний модуль для зв'язку з датчиком і передачі даних на комп'ютер, оперативний запам'ятовуючий пристрій (ОЗП) для зберігання і обробки даних, енергонезалежний постійний запам'ятовуючий пристрій (ПЗП) для зберігання даних, керуючої програми і констант, клавіатуру та екран для управління режимами роботи вимірювача, відображення інформації в режимі сканування і перегляду, центральний процесор, що обробляє дані і керуючий режимами роботи датчика, ОЗП, ПЗП, екрану і клавіатури, а також формує інтерфейси RS-232, RS-485 і USB.

Ферозондовий датчик включає в себе схему збудження і обробки сигналу (СЗОС), призначену для: формування сигналів збудження для феррозондов, обробки надходячих від датчиків сигналів, усереднення і нормування результатів, передачі даних в центральний мікропроцесор. Принцип дії ферозондового датчика представлений на рис. 3.8.

Ферозондовий датчик складається з котушки, розташованої на феритних сердечників і електричного генератора. Датчик випромінює магнітне поле, одночасно зчитуючи аналоговий вихідний сигнал. Об'єкт дослідження потрапивши в зону дії датчика поглинає частину магнітного поля, тим самим змінюючи величину вихідного сигналу генератора. Аналізуючи зміну характеристики вихідного сигналу генератора прилад отримує інформацію про залишкові напруження, що містяться в зразку.

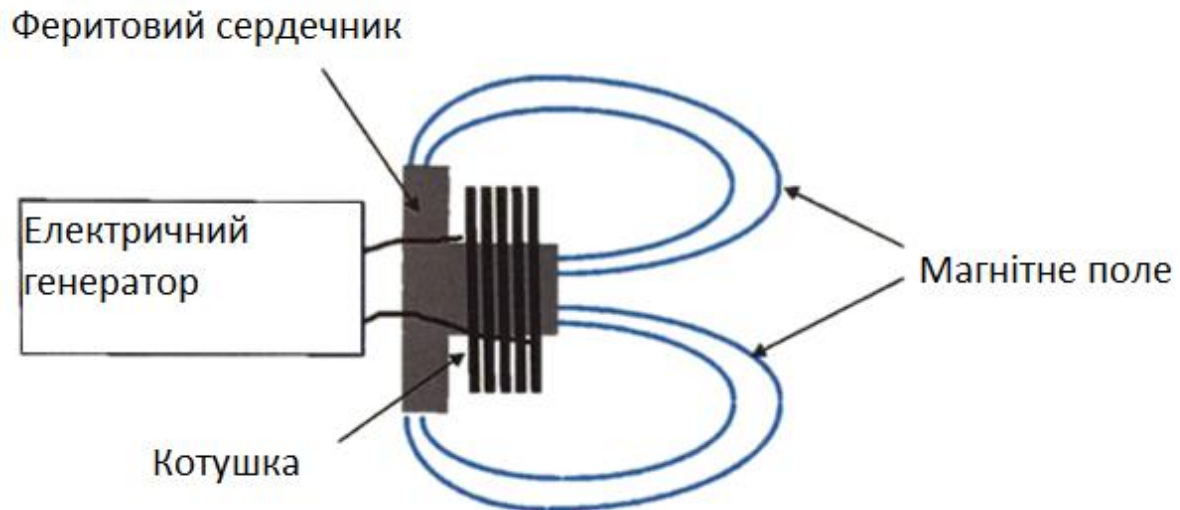


Рис. 3.8. Принцип дії ферозондового датчика.

При роботі СЗОС датчик формує на ферозондовому перетворювачі синусоїдальний струм збудження. При переміщенні датчика вздовж досліджуваного об'єкта на його виході формується сигнал, пропорційний до зовнішнього магнітного поля, який посилюється і надходить на вимірювальний вхід СЗОС, де вимірюється і нормується. При надходженні імпульсу від датчика пройденої відстані СЗОС передає поточні значення напруженості магнітного поля центрального процесора для запису в ОЗП і виведення на екран. Масштаб виведених на екран даних змінюється автоматично в залежності від величини зовнішнього магнітного поля.

3.4 Експериментальне дослідження впливу вібрації на величину залишкових напружень

3.3.1. Методика і зміст експерименту по визначенню впливу вібрації на рівень залишкових напружень в зварному шві

Метою роботи є підтвердження теорії, описаної в другій частині даної дисертації, виявлення закономірностей зміни рівня залишкових напружень при зварюванні трубних заготовок із застосуванням вібрації різних частот. Результатом дослідження є встановлення функціональної залежності величини залишкових напружень і структури зварного шва та біляшовної зони труби від частоти вібрації, яка застосовується в процесі зварювання трубної

заготовки.

Експериментальні дослідження впливу вібрації на величину залишкових напружень проводилися в лабораторії кафедри Технологічного проектування Національної металургійної академії України. Вимірювання залишкових напружень в зразках методом магнітної пам'яті металу проводилося в Придніпровському центрі неруйнівного контролю та технічної діагностики.

В ході експерименту проводилося:

- зварювання прямошовних попередньо сформованих трубних заготовок із застосуванням вібраційного впливу різних частот;
- фіксування величини залишкових напружень в звареному шві та біляшовній зоні зразків, отриманих в ході експерименту;
- обробка отриманих в процесі експерименту даних.

Вихідна заготовка отримана на підприємстві ПрАТ «ДМЗ КОМІНМЕТ», формування проводилося в трубоелектрозварювальному цеху №2.

Трубоелектрозварювальний цех № 2 має в своєму складі трубопрофілеелектрозварний агрегат ТПЕЗА 20-114, на якому виробляються труби водогазопровідні зовнішнім діаметром від 21,3 мм до 114,0мм;

В якості вихідної заготовки для проведення експерименту була обрана сформована трубна заготовка без нанесення зварного шва, вироблена згідно ТУ 14-236-15-93 Труби сталеві електрозварні для побутових потреб. Основні характеристики заготовки для експерименту представлені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6. Характеристики вихідної заготовки.

Параметр	Значення
Зовнішній діаметр, мм	89
Товщина стінки, мм	4
Марка сталі	ЗПС
Номер плавки	1010610

3.3.1.1. Характеристика сталі ЗПС.

Клас і аналоги стали ЗПС. Клас: Сталь конструкційна вуглецева звичайної якості.

Деякі зарубіжні аналоги: K01804, K02702, S235J2G3, S235JRG2, SS400, S235J2G3, S235JRG2, Fe360BFU, Fe360D1FF, S235J2G3, S235J2G3, S235JRG3.

Хімічний склад:

Вуглець	-	0.14-0.22%;
Кремній	-	0.05-0.15%;
Мідь	-	до 0.3%;
Марганець	-	0.4-0.65%;
Нікель	-	до 0.3%;
Азот	-	до 0.008 %;
Фосфор	-	0.04 %;
Хром	-	до 0.3 %;
Сіра	-	до 0.05 %;
Миш'як	-	0.08 %.

Призначення і використання стали ЗПС. Сталь ЗПС призначена для використання в зоні помірного клімату. Її можна піддавати токарній і фрезерній обробці, поперечному різанню, дробеструйній обробці, сверловці, а також виправленню, тому вона широко використовується в різних галузях промисловості.

Особливості сталі ЗПС:

- сталь ЗПС не схильна до відпускної крихкості;
- вироби мають гладку поверхню;
- не викликає алергічних реакцій;
- підлягає фарбуванню.

Заготовки із сталі ЗПС можна зварювати з використанням практично всіх сучасних методів: ручна дугова зварка, електрошлакове зварювання і контактно-точкове зварювання, аргонодугове зварювання під флюсом і газовим захистом, при цьому сплав не втрачає своїх позитивних властивостей.

Якщо товщина сталі складає більше 36 мм, рекомендується піддати метал підігріванню і термічній обробці.

3.3.1.2. Характеристика методу зварювання.

За рахунок своєї поширеності і максимального наближення до промислових умов виробництва труб для експерименту по зварюванню зразків на вибростолі був обраний інверторний метод зварювання.

При проведенні експерименту використовувався зварювальний апарат Powercraft PWI-245. Основні характеристики апарату представлені в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7. Характеристики зварювального апарату Powercraft PWI-245.

Параметр	Значення
Виробник:	Powercraft
Тип:	Зварний інвертор
Вид зварки:	ММА
Тип електричного струму:	змінний
Напруга мережі, В:	220
Напруга холостого ходу, В:	26,2
Кількість фаз:	1
Потужність, Вт:	6000
Максимальний зварювальний струм, А:	250
Мінімальний зварювальний струм, А:	20
Цикл роботи:	60%-195А
Максимальний діаметр електроду, мм:	5
Мінімальний діаметр електроду, мм:	1
Кількість позицій регулювання струму:	плавне регулювання

У процесі зварювання застосовувалися електроди марки МОНОЛІТ РЦ діаметром 4 мм. Призначений для ручного дугового зварювання на постійному або змінному струмі рядових і відповідальних конструкцій з низьковуглецевих марок сталей, що поставляються по ДСТУ 2651 / ГОСТ 380 (Ст 0, Ст 1, Ст 2,

Ст 3 всіх груп А, Б, В і всіх ступенів розкислення - "КП", "ПС", "СП") і по ГОСТ 1050 (05кп, 08кп, 08пс, 08, 10кп, 10пс, 10, 15кп, 15пс, 15, 20кп, 20пс, 20), у всіх просторових положеннях (крім вертикального зверху вниз для електродів діаметром 5,0 мм).

У таблицях 3.8 і 3.9 представлені хімічний склад і механічні властивості металу зварного шва.

Таблиця 3.8. Хімічний склад наплавленого металу, %.

Mn	Si	C	P	S
0,40-0,65	0,15-0,40	$\leq 0,11$	$\leq 0,035$	$\leq 0,030$

Таблиця 3.9. Механічні властивості металу зварного шва.

Тимчасовий опір, Н/мм ²	Відносне подовження, %	Ударна в'язкість, Дж/см ²
≥ 450	≥ 22	≥ 78

3.3.2. Проведення експерименту по встановленню впливу вібрації на величину залишкових напружень

Експериментальні дослідження впливу вібрації на величину залишкових напружень проводилися в лабораторії кафедри Технологічного проектування Національної металургійної академії України. На рис. 3.9 продемонстрована трубна заготовка, що зафіксована на робочій поверхні вібростолу в процесі зварювання.

Отримана на ПрАТ «ДМЗ КОМІНМЕТ» заготовка, для отримання найбільш повного розуміння про закономірності зміни рівня залишкових напружень при зварюванні із застосуванням вібрації різних частот, була розділена на зразки однакової довжини 150 мм.



Рис. 3.9. Трубна заготовка на робочій поверхні вібростолу в процесі зварювання.

Розподіл зразків відповідно до частоти вібрації, що застовувалася в процесі зварювання, представлено в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10. Розподіл зразків відповідно до частоти вібрації.

Номер зразка	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Частота вібрації, Гц	0	10	25	50	75	100	125	150	175	200

В експерименті використовувався вібраційний стіл, описаний в даному розділі дисертації. Трубна заготовка жорстко закріплювалася на вібраційному столі з попередніми підтисненням кромки для оптимального процесу

зварювання металу і максимального наближення експерименту до технологічних умов діючого виробництва.

3.3.3. Дослідження зразків методом магнітної пам'яті металу

Вимірювання залишкових напружень в зразках методом магнітної пам'яті металу проводилося в Придніпровському центрі неруйнівного контролю та технічної діагностики.

Діагностика проводилася відповідно до Методичних вказівок з технічного діагностування судин і апаратів з використанням методу магнітної пам'яті металу (МПМ). На рис. 3.10 продемонстрований процес вимірювання залишкових напружень в зразках методом магнітної пам'яті металу.



Рис. 3.10. Процес вимірювання залишкових напружень в зразках методом магнітної пам'яті металу

Для найбільш повного отримання інформації про залишкові напруження виміри проводилися в поперечному перетині зразків. Таким чином в область дослідження потрапили і зварений шов, і біляшовні зони з обох сторін від осі зварного шва, і основний метал труби. На рис. 3.10 показана принципова схема виконання замірів.

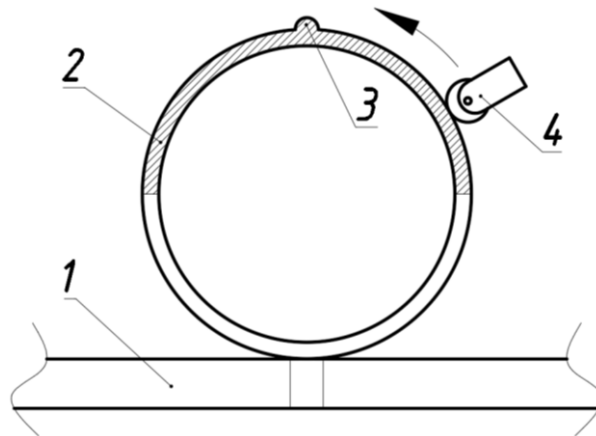


Рис. 3.10. Принципова схема виконання замірів: 1 – вибродостол; 2 – область дослідження; 3 – валик зварного шва; 4 – датчик.

Зразки вимірювалися датчиком з двома ферозондовими перетворювачами. Під час налаштування програмного забезпечення перед виконанням вимірів були введені коригувальні параметри заготовки:

- товщина металу досліджуваного зразка, мм – $S - 4$
- ширина зварного шва, мм – $b - 15$

Аналіз отриманих результатів проводився за допомогою програмного забезпечення «Программа обработки результатов контроля по Методу Магнитной Памяти», яке виробляє компанія «Энергодиагностика».

За допомогою вбудованого в програму модуля аналізу була проведена обробка отриманих даних і виведені середні значення K_{cp} – середнє зважене значення інтенсивності зміни магнітного поля розсіювання H_p .

Якість зварних з'єднань при такій методиці контролю оцінюється за характером розподілу магнітного поля розсіювання H_p і за значеннями

магнітного коефіцієнта інтенсивності зміни цього поля по довжині для кожного каналу вимірювань і між каналами.

Варто відзначити, що метод магнітної пам'яті металу не дає пряму кількісну оцінку діючих напружень, так як є приладом неруйнівного контролю, що спеціалізуються на пошуку зон концентрації напружень. В даному експерименті аналізувалося співвідношення середніх величин залишкових напружень (K_{cp}) у порівнянні з аналогічним параметром першого зразка, звареним без вібрації.

K_{cp} є ключовим параметром даного експерименту, що характеризує середнє значення величини залишкових напружень. Проаналізувавши розподіл даного параметра ми отримаємо функціональну залежність величини залишкових напружень в звареному шві та біляшовній зоні труби від частоти вібрації, яка застосовується в процесі зварювання трубної заготовки.

3.3.4. Систематизація отриманих даних

При аналізі зварних швів методом магнітної пам'яті металу основними параметрами, котрі характеризують залишкові напруження і їх концентрацію, є наступні:

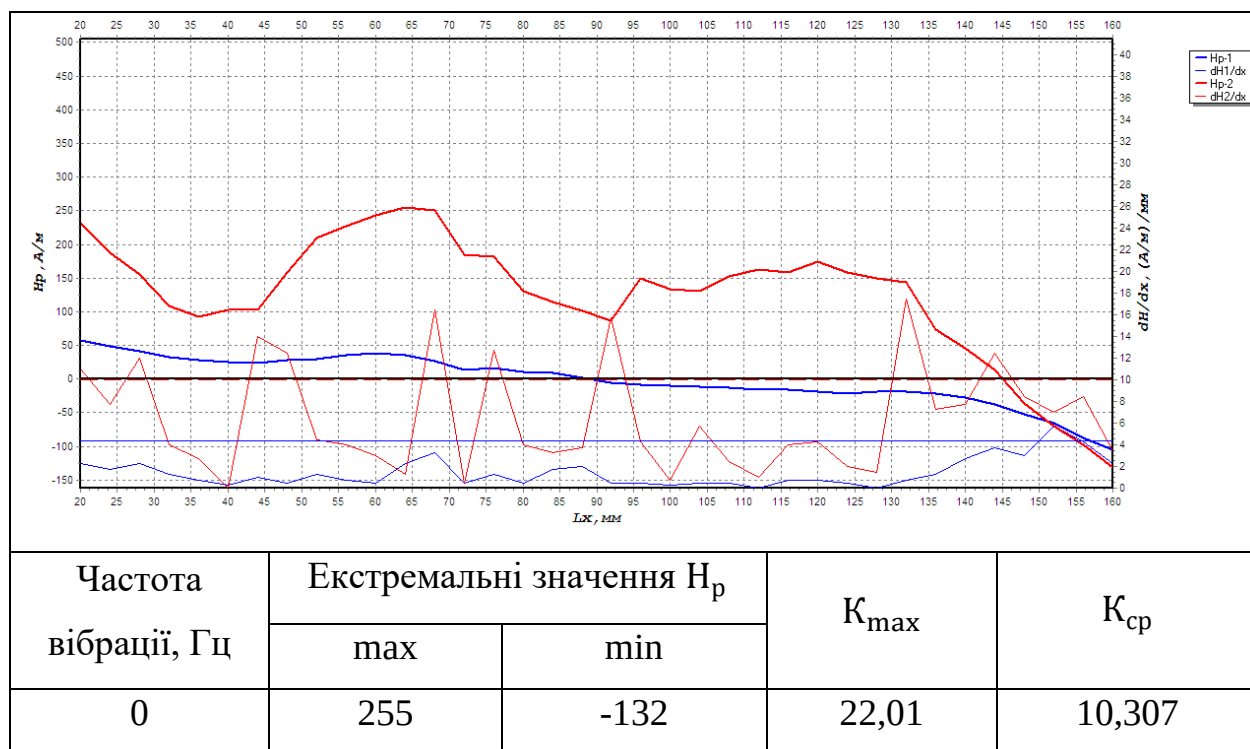
Екстремальні значення – максимальні та мінімальні значення магнітного поля розсіювання H_p в зоні контролю, (А/м).

K_{max} – максимальна зміна магнітного поля розсіювання H_p , характеризує зону концентрації залишкових напружень, (А/м²).

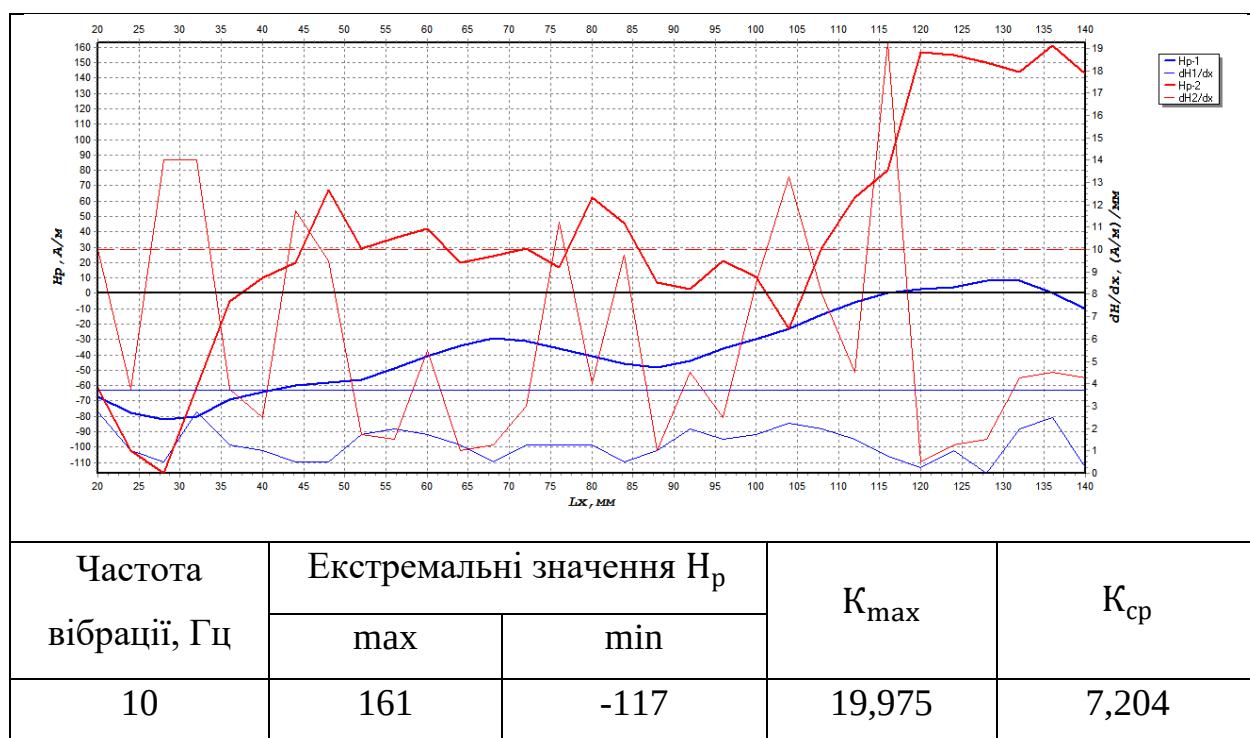
K_{cp} – середнє зважене значення інтенсивності зміни магнітного поля розсіювання H_p , (А/м²).

3.3.4.1. Картки даних зміни залишкових напружень за зразками дослідження.

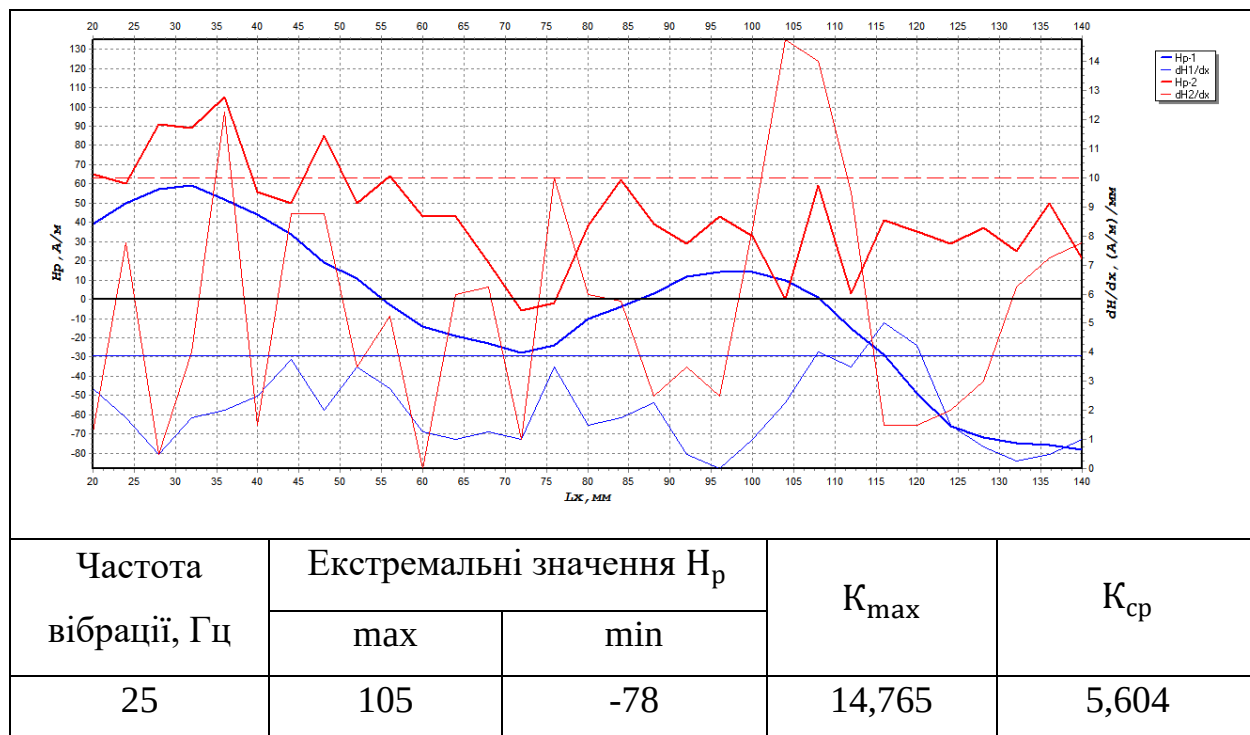
Таблиця 3.11. Зразок №1.



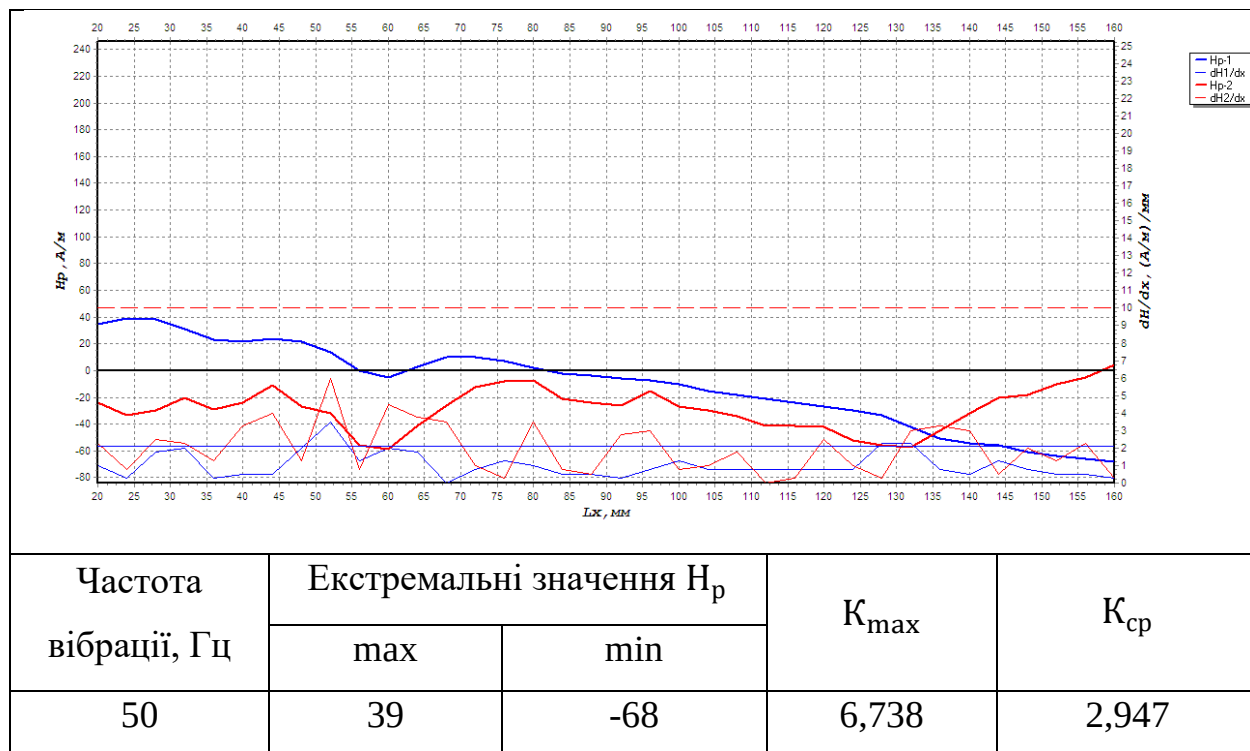
Таблиця 3.12. Зразок №2.



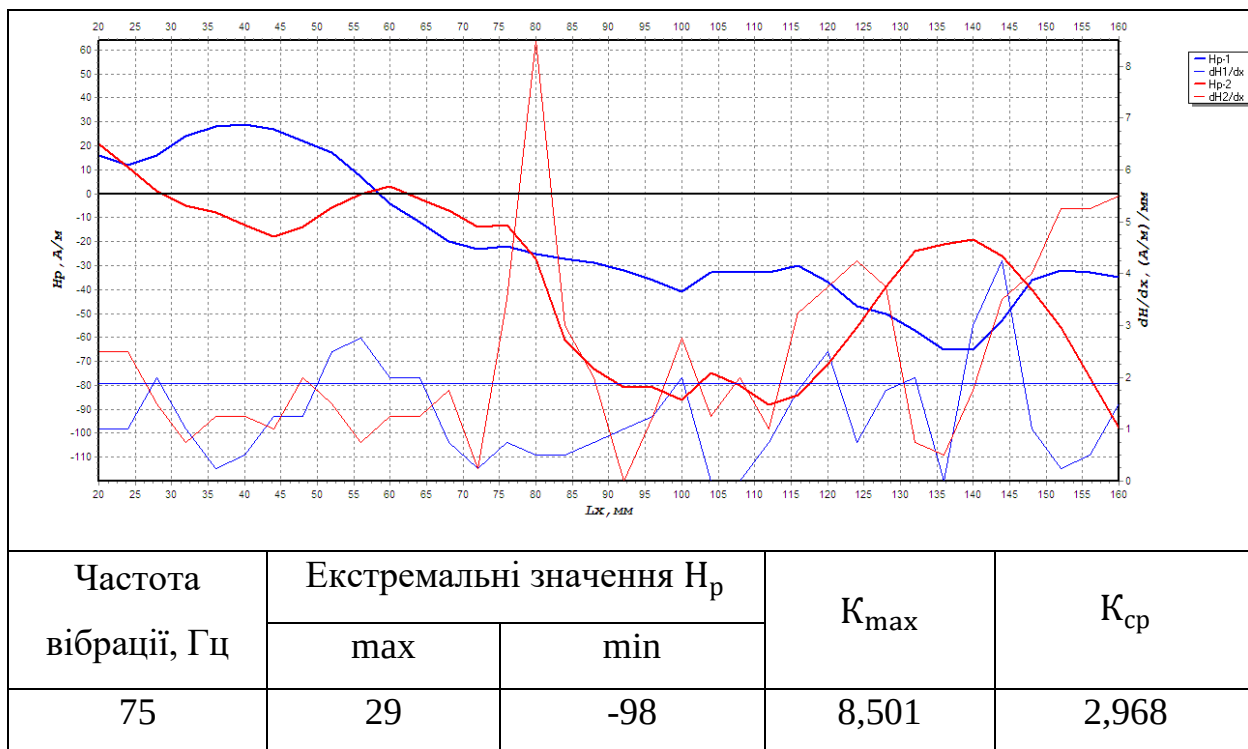
Таблиця 3.13. Зразок №3.



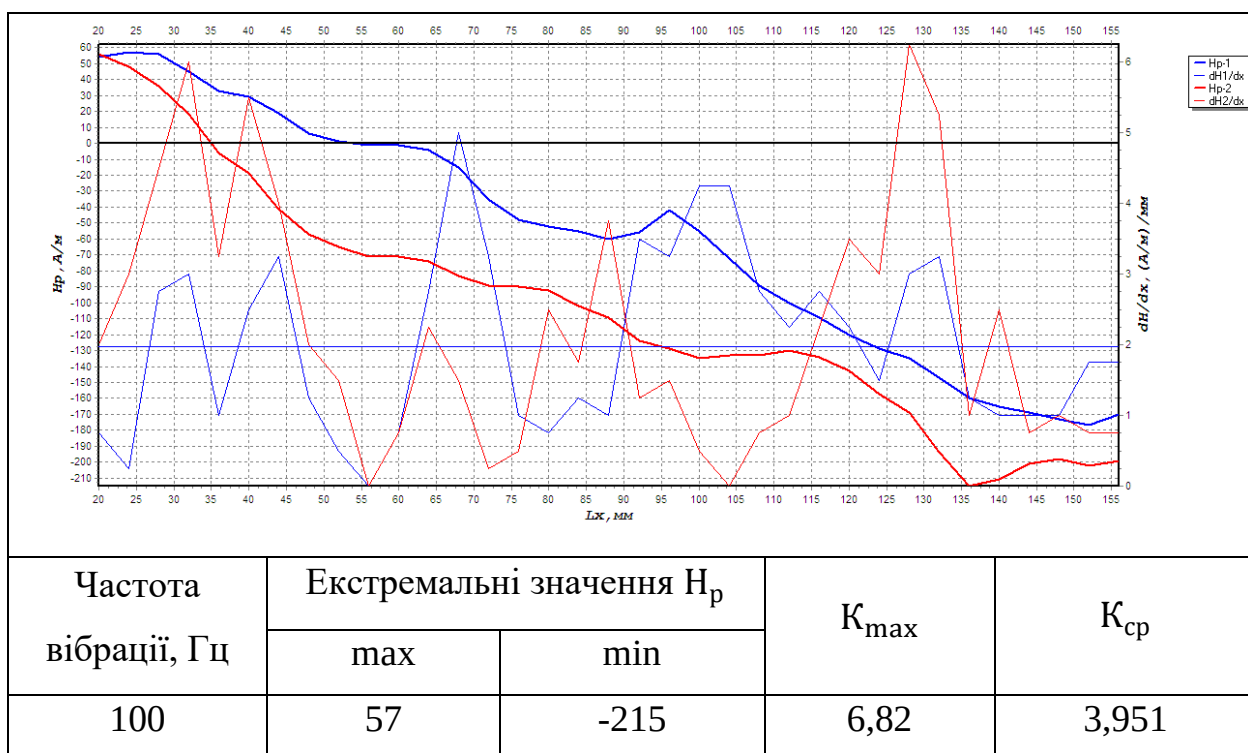
Таблиця 3.14. Зразок №4.



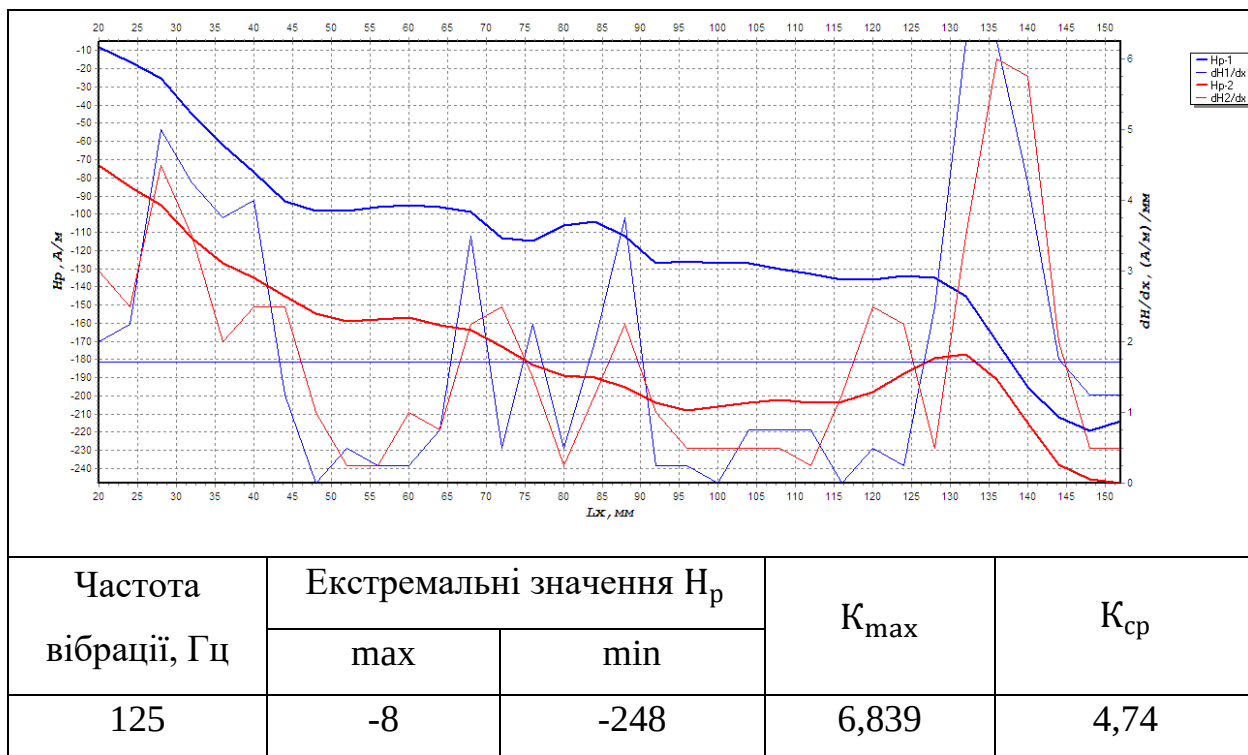
Таблиця 3.15. Зразок №5.



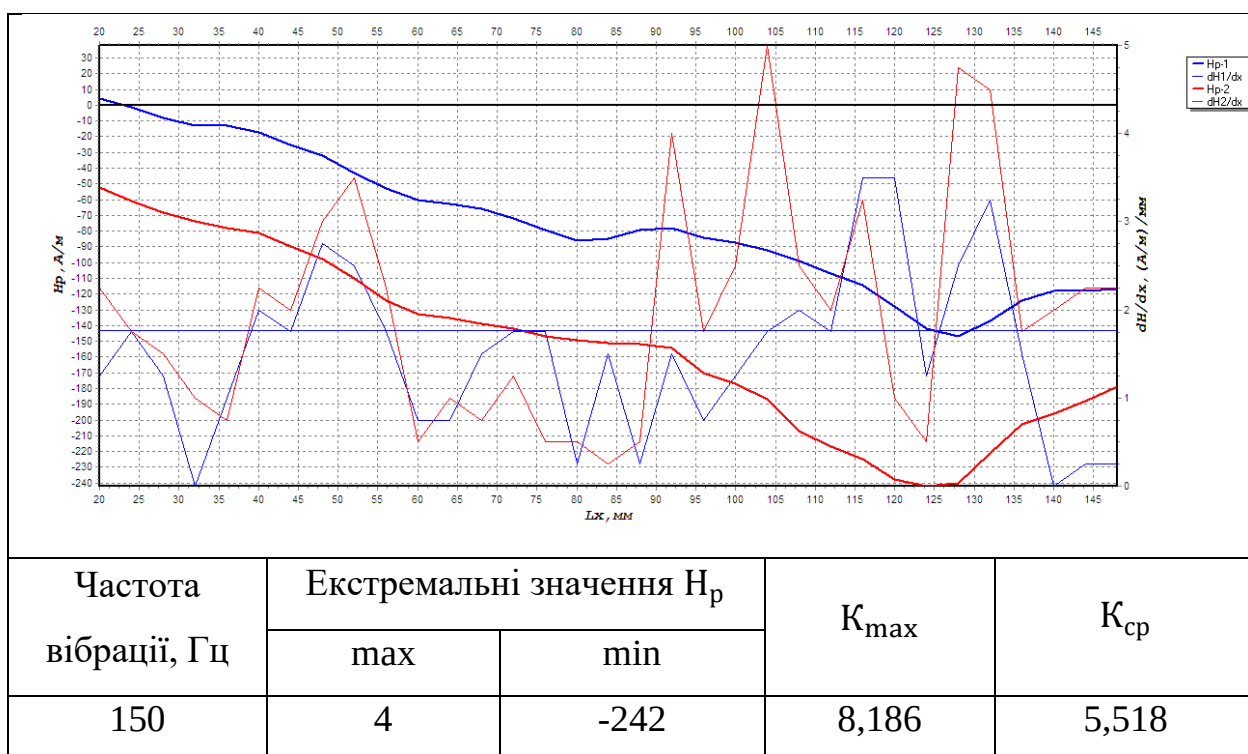
Таблиця 3.16. Зразок №6.



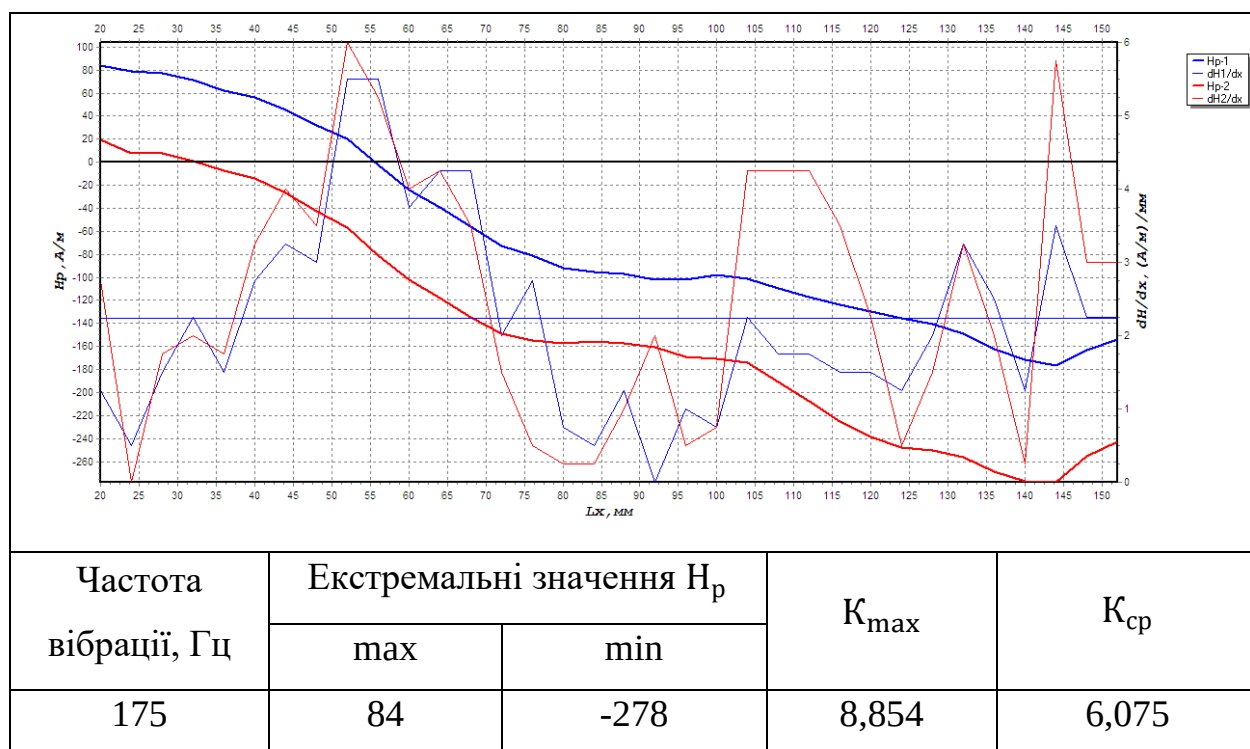
Таблиця 3.17. Зразок №7.



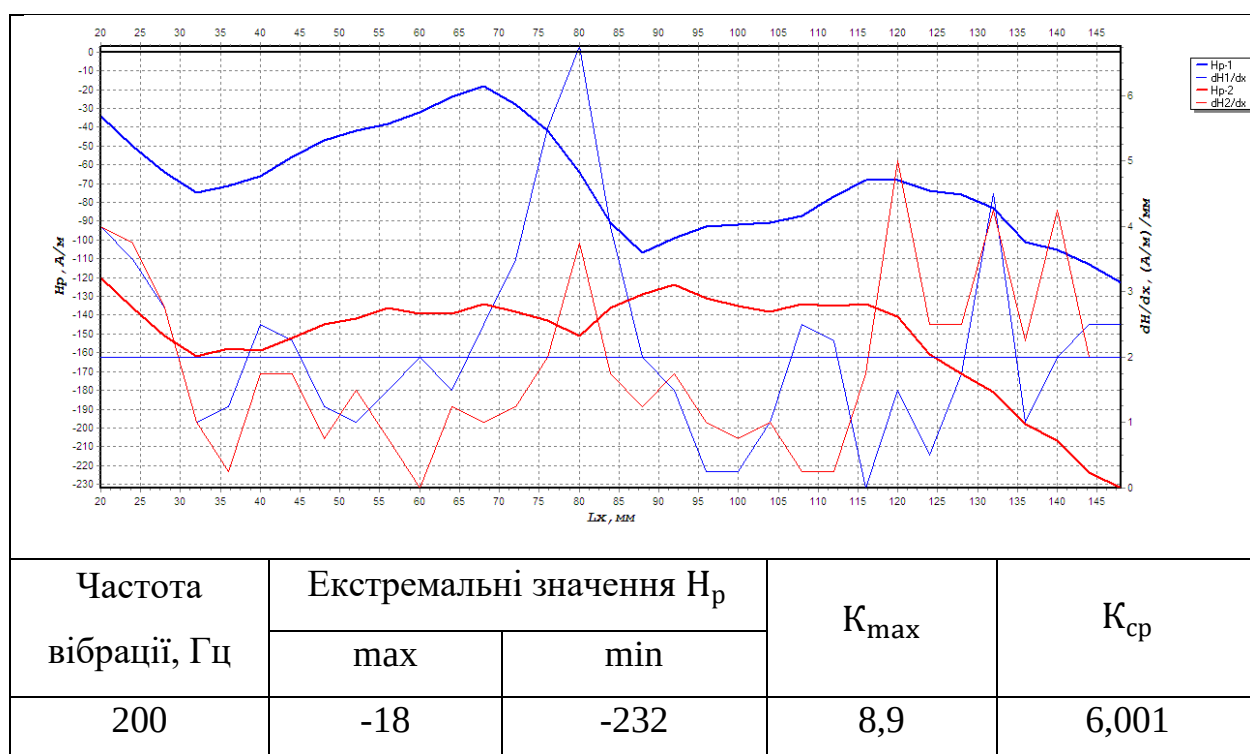
Таблиця 3.18. Зразок №8.



Таблиця 3.19. Зразок №9.



Таблиця 3.20. Зразок №10.



3.3.5. Обробка результатів експерименту

Аналізуючи отримані в ході експерименту дані можна зробити наступні висновки.

3.3.5.1. Аналіз графіків розподілу залишкових напружень від частоти вібрації при зварюванні.

Відповідно до методичних вказівок з технічного діагностування судин і апаратів з використанням методу магнітної пам'яті металу (МПМ), найбільш схильними до розвитку пошкоджень є ділянки зварного шва, на яких зафіксовані максимальні коефіцієнти інтенсивності $K_{\max}$ різнополярного розподілу поля H_p між сусідніми каналами вимірювань і/або максимальне значення коефіцієнта інтенсивності dH/dx зміни поля H_p за допомогою одного з каналів вимірювань.

Так як на величину залишкових напружень можуть впливати різні чинники, такі як неметалеві включення і дефекти зварного шва, характер розподілу напружень в поперечному перетині на графіках може не описувати повну картину розподілу, однак дає чітке розуміння про середній рівень залишкових напружень в усьому зразку.

Аналізуючи отримані графіки можна простежити тенденцію до пікової концентрації залишкових напружень в біляшовних зонах зварних швів. При цьому значення напружень в різних напрямках щодо осі зварного шва є несиметричними – одне зі значень завжди більше іншого.

Даний ефект імовірно пов'язаний з незначною несиметричністю самого процесу формування та зварювання трубної заготовки в експериментальних умовах. При цьому залишкові напруження, чутливі до будь-яких неточностей і невідповідностей технологічного процесу, реагують більш інтенсивної концентрацією напружень в напрямку біляшовної зони, яка має до цього схильність.

3.3.5.2. Аналіз тенденції зміни залишкових напружень.

Аналізуючи тенденцію зміни залишкових напружень, простежуємою на всьому діапазоні вимірювань можна побудувати графік, що описує закономірності зміни рівня залишкових напружень, що описується параметром K_{cp} , при зварюванні трубних заготовок із застосуванням вібрації різних частот (рис. 3.11).

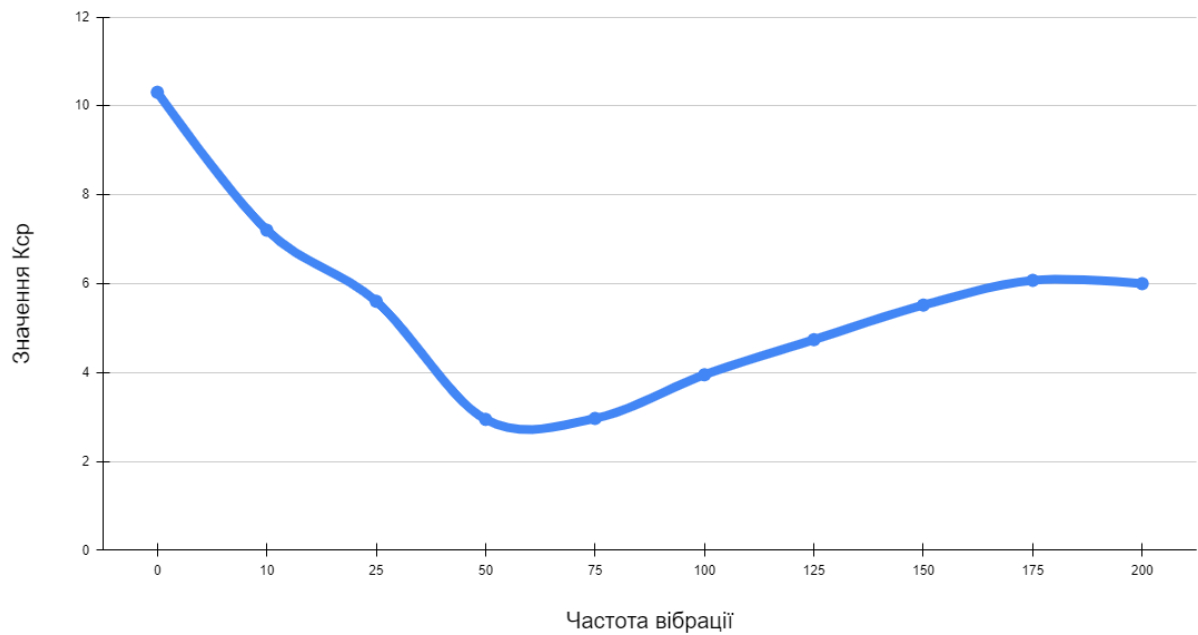


Рис. 3.11. Графік залежності рівня залишкових напружень від застосованої в процесі зварювання частоти вібрації.

Як видно на рис. 3.11, перший зразок діапазону, зварений без застосування вібрації, має дуже високе значення залишкових напружень – 10,307 А/м². Так як до зразку №1 не застосовувалися ніякі заходи по зняттю залишкових напружень, вважається, що він містить в собі повний обсяг залишкових напружень, фізично реалізованих в рамках даного експерименту – 100% залишкових напружень. Значення всіх наступних зразків, що проходили процедуру зняття залишкових напружень за допомогою застосування вібрації в процесі зварювання, зіставлялися зі зразком №1 і в процентному співвідношенні фіксувалися величини зняття залишкових напружень при конкретній частоті вібрації.

Зразок №2 піддавався в процесі зварювання вібрації величиною в 10 Гц, при цьому простежується позитивний вплив вібрації – залишкові напруження зразку знизилися на 30,11%. Відповідно до робіт, описаних у другій частині даної дисертації, частоти вібрацій нижче 10 Гц є оптимальними для марок сталі подібної Зпс при процесах пресування та волочіння. Однак, при

застосуванні даної частоти для процесу зварювання показник зняття залишкових напружень є занадто малим для ефективного застосування на виробництві.

При збільшенні частоти вібрації до 25 Гц в зразку №3 можна бачити більш інтенсивне зняття залишкових напружень – 45,63%. Дана частота вібрації рекомендована до застосування в процесах кристалізації рідкого металу при виробництві безперервнолитих заготовок [66]. Але процес застигання зварного шва, незважаючи на схожість фізичних процесів рідкої складової металу, набагато більш швидкоплинний, ніж кристалізація безперервнолитого злитка. Метал зварного шва при охолодженні не встигає сприйняти силу вібрації, що передається йому.

Найбільш успішних результатів вдалося досягнути при застосуванні частоти вібрації в 50 Гц на зразку №4 – зняття залишкових напружень 71,41%, і при застосуванні частоти вібрації в 75 Гц на зразку №5 – зняття залишкових напружень 71,20%.

Подальше підвищення частоти вібрації демонструє зниження ефективності зняття залишкових напружень в діапазоні від 61,67% при 100 Гц в зразку №6, до 41,78% при 200 Гц в зразку №10. Імовірно це пов'язано з розсіюванням сили вібрації, спрямованої на об'єкти дослідження. Частота вібрації на момент часу занадто висока, щоб встигати сприйматися металом зварного шва. Повний обсяг отриманих в ході експерименту значень представлений у таблиці 3.21.

Таблиця 3.21. Значення, отримані в ході експерименту.

Номер зразку	Значення $K_{\text{ср}}$, А/м^2	Частота, Гц	Рівень зниження залишкових напружень, %
1	10,307	0	-
2	7,204	10	30,11%
3	5,604	25	45,63%
4	2,947	50	71,41%
5	2,968	75	71,20%
6	3,951	100	61,67%
7	4,74	125	54,01%
8	5,518	150	46,46%
9	6,075	175	41,06%
10	6,001	200	41,78%

Імовірно, дана залежність пояснюється входженням частоти сили вібрації, що змушує, в резонанс з власною частотою релаксації залишкових напружень. Таким чином, процес релаксації залишкових напружень, що відбувається в металі з часом, багаторазово прискорюється. Даний ефект підтверджується в роботі В.М. Морозенко та Є.В. Кузнєцова про резонансний вібропластичний ефект [75], що описує процеси волочіння.

3.5. Експериментальне дослідження впливу вібрації на мікроструктуру

Для дослідження мікроструктури були представлені 5 зразків зварних труб зі сталі марки ЗПС, представлені в табл. 3.22. Нумерація зразків збережена з попереднього етапу досліджень. Хімічний склад і технологія виготовлення вихідного гарячекатаного штрипса однакові. Відмінності були лише в умовах зварювання, а саме в частоті застосовуваної до зразків вібрації.

Таблиця 3.22. Зразки для дослідження мікроструктури.

Номер зразка	1	3	4	7	10
Частота вібрації, Гц	0	25	50	125	200

Слід зазначити, що якість зварних швів, виконаних в лабораторних умовах в загальній масі не відповідала міжнародним стандартам зварних

з'єднань та промисловим умовам виробництва, проте, даний факт не вплинув на результати дослідження. Однак зіставляти отримані дані з досвідченими режимами зварювання буде некоректно.

Шліфи зразків для металографічних досліджень виготовляли за загальноприйнятими методиками [106]. Вивчення мікроструктури шліфів проводилося після травлення в 4% спиртовому розчині азотної кислоти (ніталі).

Для проведення металографічного аналізу був застосований оптичний мікроскоп «Axiovert 200M MAT».

Кількісний аналіз параметрів мікроструктури здійснювали за допомогою програм автоматичного та напівавтоматичного аналізу зображення «AxioVision» компанії ZEISS – сучасними методами кількісної металографії.

Характеристики структури сталі визначалися за наступними стандартами: розмір дійсного зерна сталі за вимогами ГОСТ 5639-82 «Сталь та сплави. Методи виявлення та визначення зерна», ступінь розвитку відманштеттової структури зони перегріву зварних з'єднань за вимогами ГОСТ 5640 «Сталь. Металографічний метод оцінки мікроструктури листів та стрічки»).

Зона термічного впливу – частина основного металу прилегла до зварювального шву, що не розплавляється, але її структура і властивості змінюються під впливом нагріву при зварюванні [71]. На Рис. 3.12. зображено розподіл зон термічного впливу відносно температури.

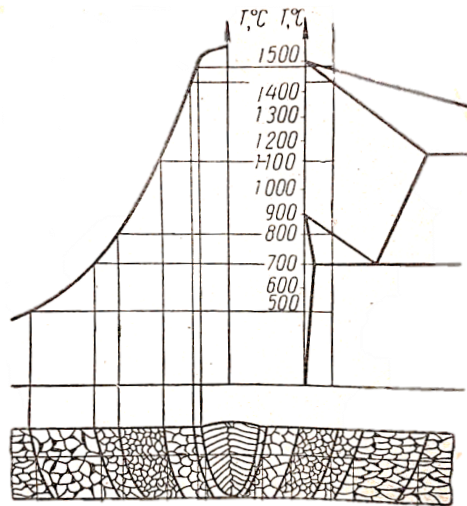


Рис. 3.12. Розподіл зон термічного впливу відносно температурі.

За ступенем впливу високих температур на метал зона термічного впливу ділиться на наступні ділянки: ділянку неповного розплавлення, ділянку перегріву, ділянку нормалізації, ділянку неповної кристалізації, ділянку рекристалізації та ділянку синьоламкості.

Ділянка неповного розплавлення є перехідним етапом від металу шва до основного металу. Ця ділянка нагрівається вище температури плавлення і знаходиться в твердо-рідкому стані. У цій області відбувається сплавлення кристалів металу шва з основним металом.

Ділянка перегріву є зоною значно перегрітого основного металу (1100-1500°C) з крупнозернистою структурою. Для цієї ділянки характерно зниження фізичних властивостей пластичності та ударної в'язкості. У з'єднаннях з підвищеним вмістом вуглецю в цій зоні можуть утворюватися гартівні структури.

Ділянка нормалізації є нагрітим від 930 до 1100°C основним металом. Знаходиться метал нагрітим до такої температури недовго і в процесі перекристалізації формує дрібнозернисту структуру металу. Механічні властивості ділянки підвищуються в порівнянні зі станом до зварювання.

Ділянка неповної перекристалізації є областю нагрітою до 720-850°C. Для цієї ділянки характерна неповна зміна структури металу. Навколо зерен фериту в даній ділянці знаходяться дрібні зерна фериту і перліту, що

утворилися в процесі перекристалізації. Як впливає з назви в цій ділянці метал не пройшов повну перекристалізацію.

Ділянкою рекристалізації є область металу, нагрітого до температури 450-720°C. Цю ділянку можна спостерігати при зварюванні сталей, що піддавалися пластичній деформації (при зварюванні прокату). На цій ділянці спостерігається відновлення зерен, підданих деформації.

Остання ділянка синьоламкості лежить в інтервалі температур від 200 до 450°C. На ділянці можна побачити сині кольори мінливості. Тут не проходить структурних змін, але для даної ділянки властиво зниження пластичних властивостей.

Дослідження впливу режимів зварювання на мікроструктуру проводилося шляхом оцінки по морфології і кількісних характеристик структурних складових найбільш чутливих і характерних зон – наплавлений метал, перегрів і нормалізації.

Розміри кристалітів наплавленого металу в усіх зразках мають схожий розмір зерна, тому в подальшому в роботі детально розглядатися не будуть. Основний метал має класичну ферито-перлитну структуру гарячекатаного металу (рис. 3.13). Середній розмір зерна фериту становить 17 мкм.



Рис. 3.13. Структура гарячекатаної заготовки для виготовлення зварних труб, сталь марки ЗПС.

Далі будуть проаналізовані кожен з представлених для аналізу зразків. На рис. 3.14 представлений загальний вигляд поперечних шліфів для вивчення мікроструктури, вироблених з експериментальних зразків труб.



Рис. 3.14. Загальний вигляд поперечного шліфа.

3.5.1. Аналіз мікроструктури Зразка №1

Зразок №1 був отриманий без застосування вібраційної обробки. Зони зварного з'єднання даного зразка наочно представлені на рис. 3.15.

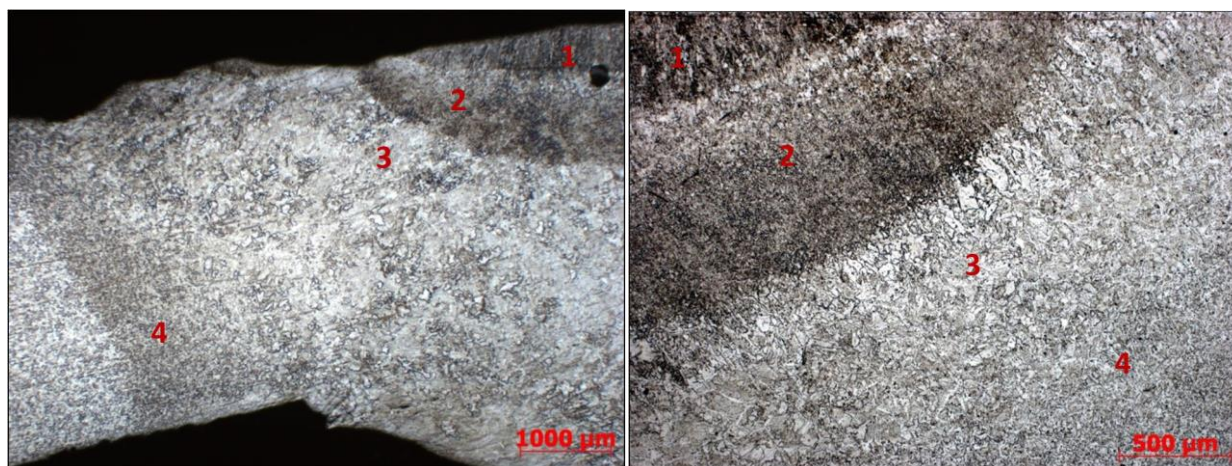


Рис. 3.15. Структура зварного шва, зразок №1: 1 – зона наплавленого металу, 2 – ділянка з наддрібним зерном, 3 – ділянка перегріву, 4 – ділянка нормалізації.

Структура сполуки має характерний вид зварного шва, однак звертає на себе увагу наявність в ділянці, що відповідає зоні неповного розплавлення, вкрай дрібнозернистої структури (розмір зерна фериту не перевищує 8 мкм, при цьому середній розмір зерна становить 3,2 мкм), замикає її обрамлення з великих зерен фериту, витягнутих у напрямку відводу тепла. Наявність феритного обрамлення в структурі зварного шва, як правило, характерно для середньо- та маловуглецевих сталей при правильно виконаних зварювальних роботах. Слід зазначити, що подібна особливість зварного шва виявлена тільки в першому зразку, в інших зразках ділянка наддрібних зерен під шаром розплавленого металу відсутня.

Після феритного обрамлення розташована ділянка перегріву, яка має вигляд голчастої структури, яка переходить в ділянку нормалізації. Середній розмір пакетів Відманштетта становить 93 мкм. Бал відманштеттової структури в ділянці перегріву зони термічного впливу зварного шва: 2-3.

Середній розмір нормалізованих зерен становить 8 мкм. Згідно з літературними даними, ділянка нормалізації характеризується найменшим зерном фериту при зварюванні маловуглецевих сталей, проте тут структура значно більша за розглянуту вище дрібнозернисту структуру. Ступінь різнозернистості в ділянці нормалізації зони термічного впливу зварного шва становить 0,44. Характерні фото мікроструктур представлені на рис. 3.16.

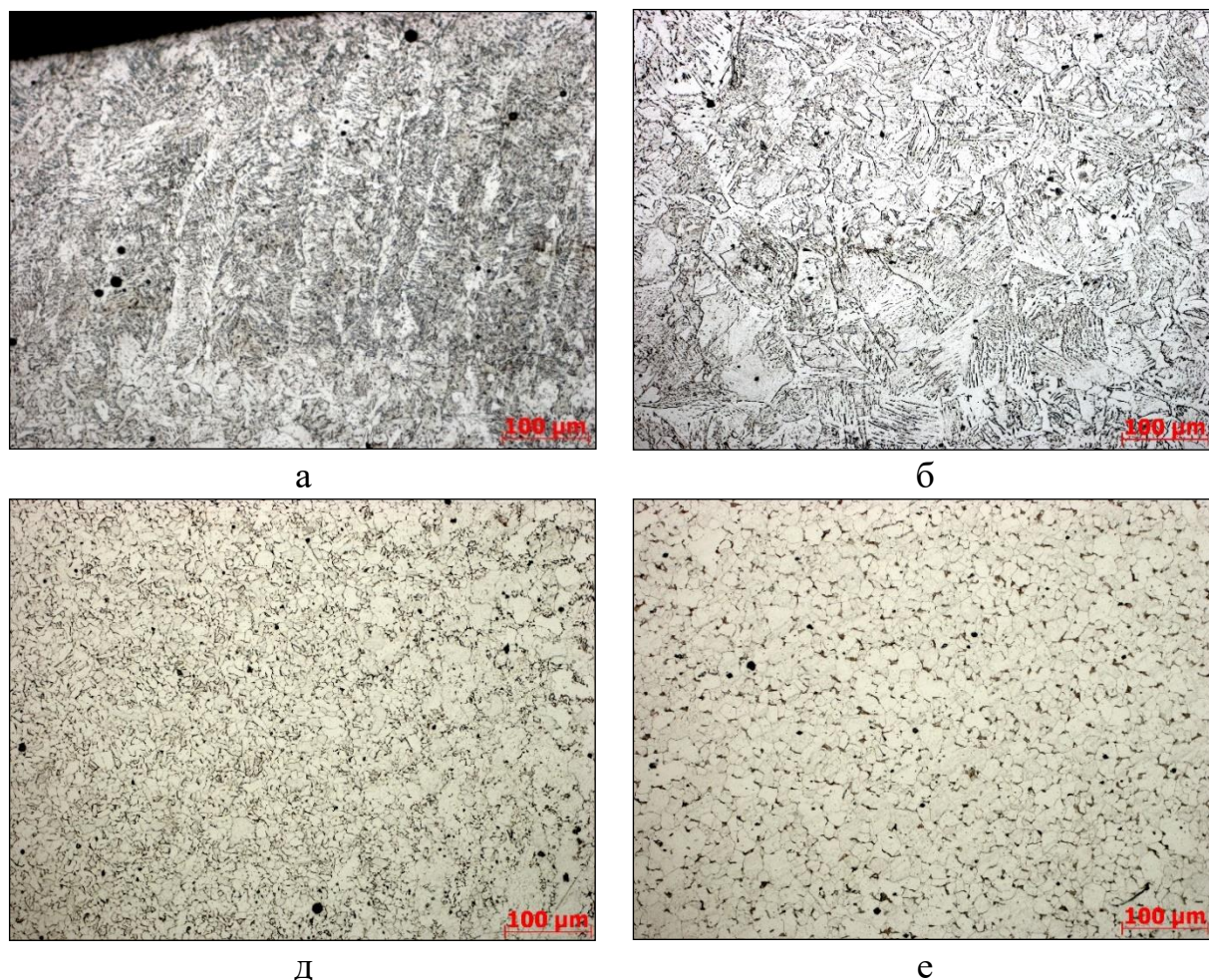


Рис. 3.16. Структура зварного шва, зразок №1: а – зона наплавленого металу, б – ділянка перегріву, в – ділянка нормалізації, г – основний метал.

3.5.2. Аналіз мікроструктури Зразка №3

Зразок №3 було отримано із застосуванням вібраційної обробки частотою 25 Гц. Структурні зони, характерні для структури даного зварного шва наведені на рис. 3.17. Структура зон зварного шва характеризується найменшою протяжністю зони термічного впливу в порівнянні з усіма іншими зразками, представленими для аналізу.

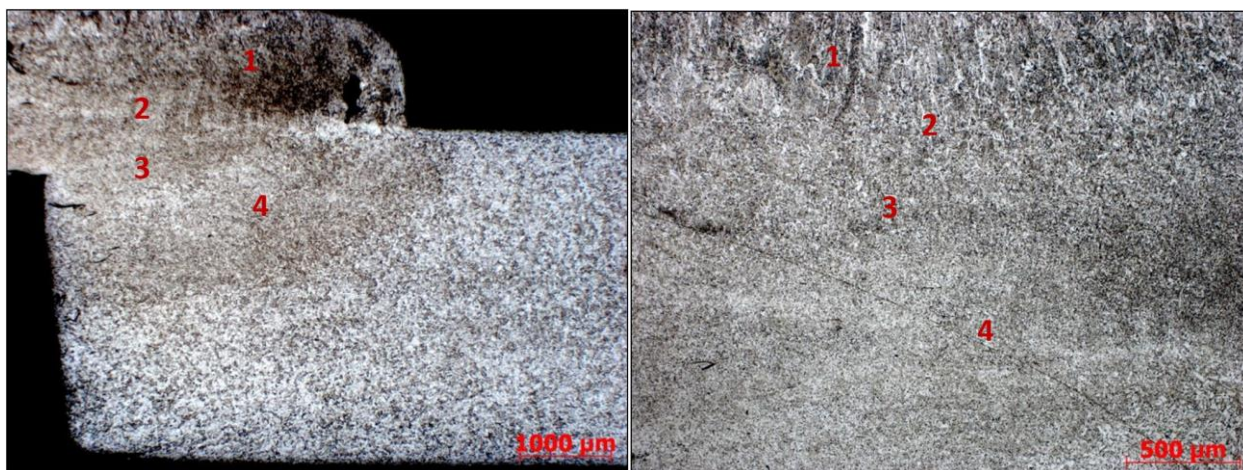


Рис. 3.17. Структура зварного шва, зразок №3: 1 – зона наплавленого металу, 2 – ділянка сплаву, 3 – ділянка перегріву, 4 – ділянка нормалізації.



а



б



в



г

Рис. 3.18. Структура зварного шва, зразок №3: а – зона наплавленого металу, б – ділянка перегріву, в – ділянку нормалізації, г – основний метал.

Кристаліти мають розмір, відповідний розміру всього наплавленого металу. На ділянці перегріву спостерігається структура Видманштетта, розмір зерен становить 40 мкм, максимальний розмір не перевищує 57 мкм. Бал відманштеттової структури в ділянці перегріву зони термічного впливу зварного шва: 1-2.

У нормалізованій ділянці сталося подрібнення гарячекатаної зеренної структури (середній розмір зерна становить 6 мкм). Ступінь різнозернистості в ділянці нормалізації зони термічного впливу зварного шва становить 0,41. Характерні фото мікроструктур представлені на рис. 3.18.

3.5.3. Аналіз мікроструктури Зразка №4

Зразок №4 був отриманий із застосуванням вібраційної обробки частотою 50 Гц. Характерна мікроструктура в загальному вигляді і по зонах представлена на рис. 3.19. Структура зварного шва близька за характеристиками до з'єднання Зразка №3, однак відрізняється дещо більшою довжиною зони термічного впливу.

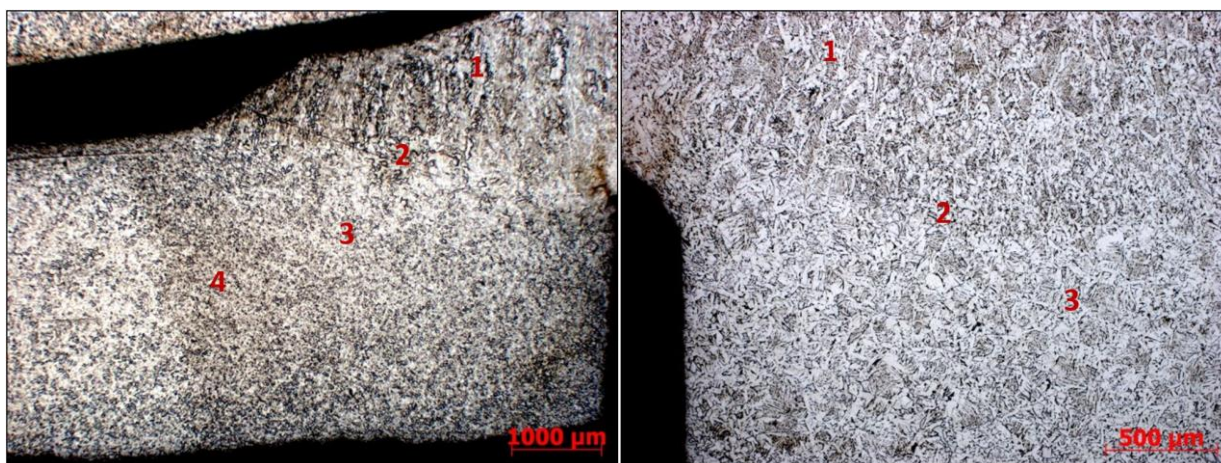


Рис. 3.19. Структура зварного шва, зразок №4: 1 – зона наплавленого металу, 2 – ділянка сплаву, 3 – ділянка перегріву, 4 – ділянка нормалізації.

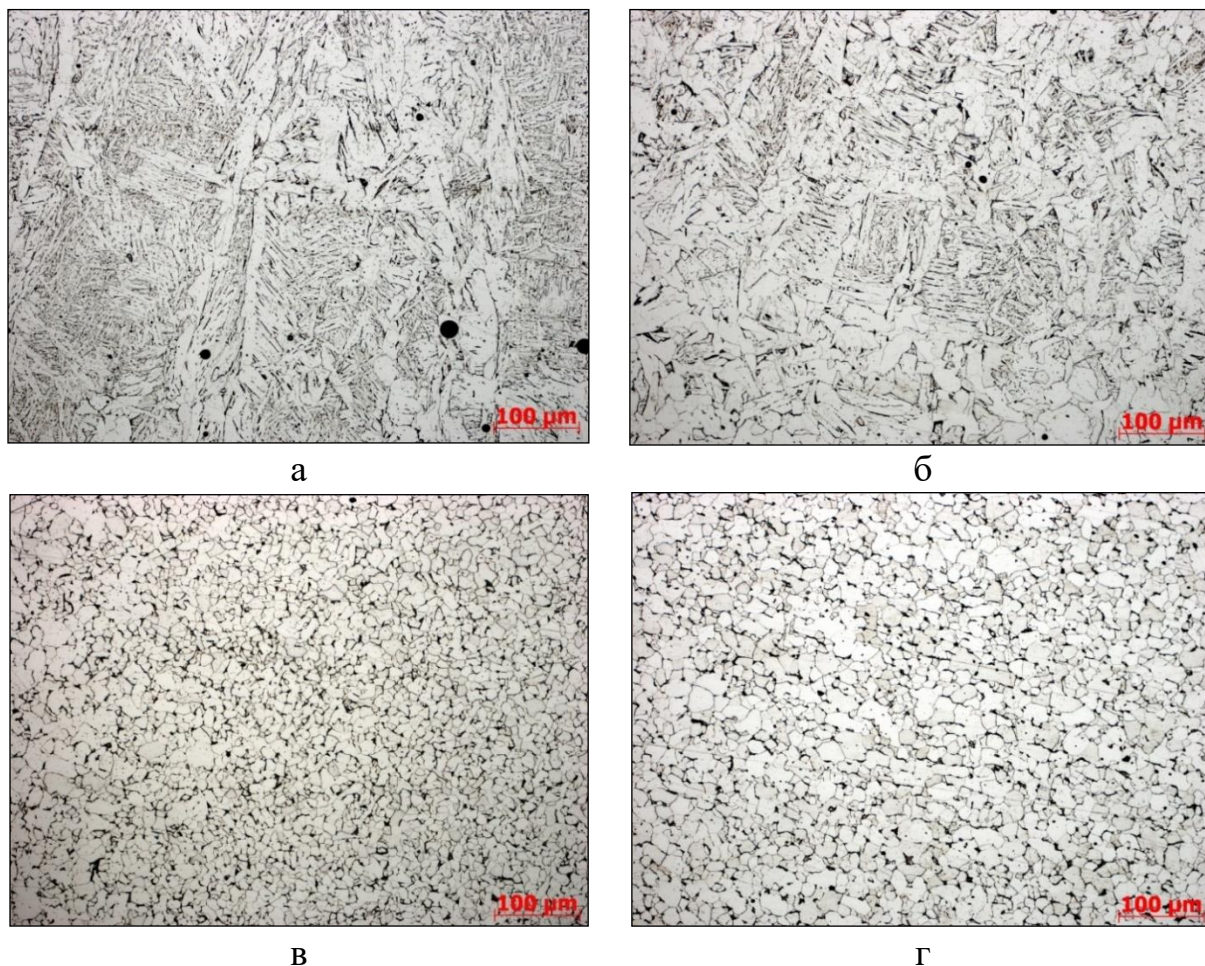


Рис. 3.20. Структура зварного шва, зразок №4: а – зона наплавленого металу, б – ділянка перегріву, в – ділянка нормалізації, г – основний метал.

Зерна Видманштетта крупніше в порівнянні зі Зразком №3. Середній розмір зерна в ділянці становить 68,5 мкм. Бал відманштеттової структури в ділянці перегріву зони термічного впливу зварного шва: 2.

В ділянці нормалізації середній розмір зерна фериту становить 11 мкм. Незважаючи на те, що середній розмір зерен незначно збільшився, структура придбала велику рівномірність. Ступінь різнозернистості в ділянці нормалізації зони термічного впливу зварного шва становить 0,37. Характерні фото мікроструктур представлені на рис. 3.20.

3.5.4. Аналіз мікроструктури Зразка №7

Зразок №7 був отриманий із застосуванням вібраційної обробки частотою 125 Гц. Цікавим в плані дослідження виявився також зразок 7.

Зварений шов характеризується малою протяжністю. Ділянка неповного розплавлення практично зливається з ділянкою перегріву. Присутні величезні зерна з відманштеттовою структурою. Зерна оточені чітким феритним обрамленням. Розмір їх вкрай нерівномірний і досягає 395 мкм (середній розмір становить 125 мкм). При цьому голки Видманштетта мають більш дрібну структуру в порівнянні з іншими зразками. Бал відманштеттової букдови в ділянці перегріву зони термічного впливу зварного шва: 4.

Безпосередньо під аномально великими зернами розташовується дрібнозерниста структура. Зона нормалізації має малу протяжність, середній розмір зерна фериту становить 10 мкм. Ступінь різнозернистості в ділянці нормалізації зони термічного впливу зварного шва становить 0,43. Характерні фото мікроструктур представлені на рис. 3.21 і 3.22.

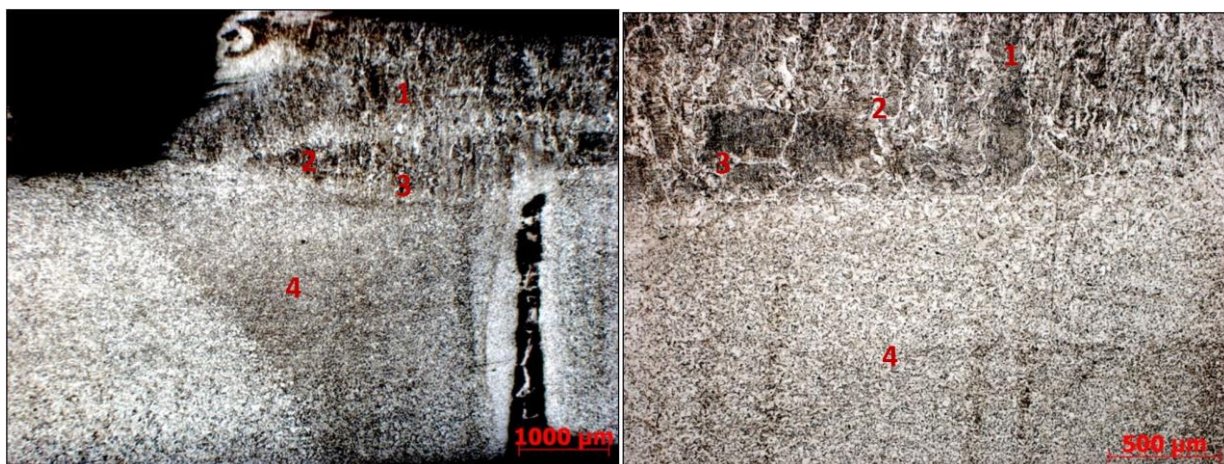


Рис. 3.21. Структура зварного шва, зразок №7: 1 – зона наплавленого металу, 2 – ділянка сплаву, 3 – ділянка перегріву, 4 – ділянка нормалізації.

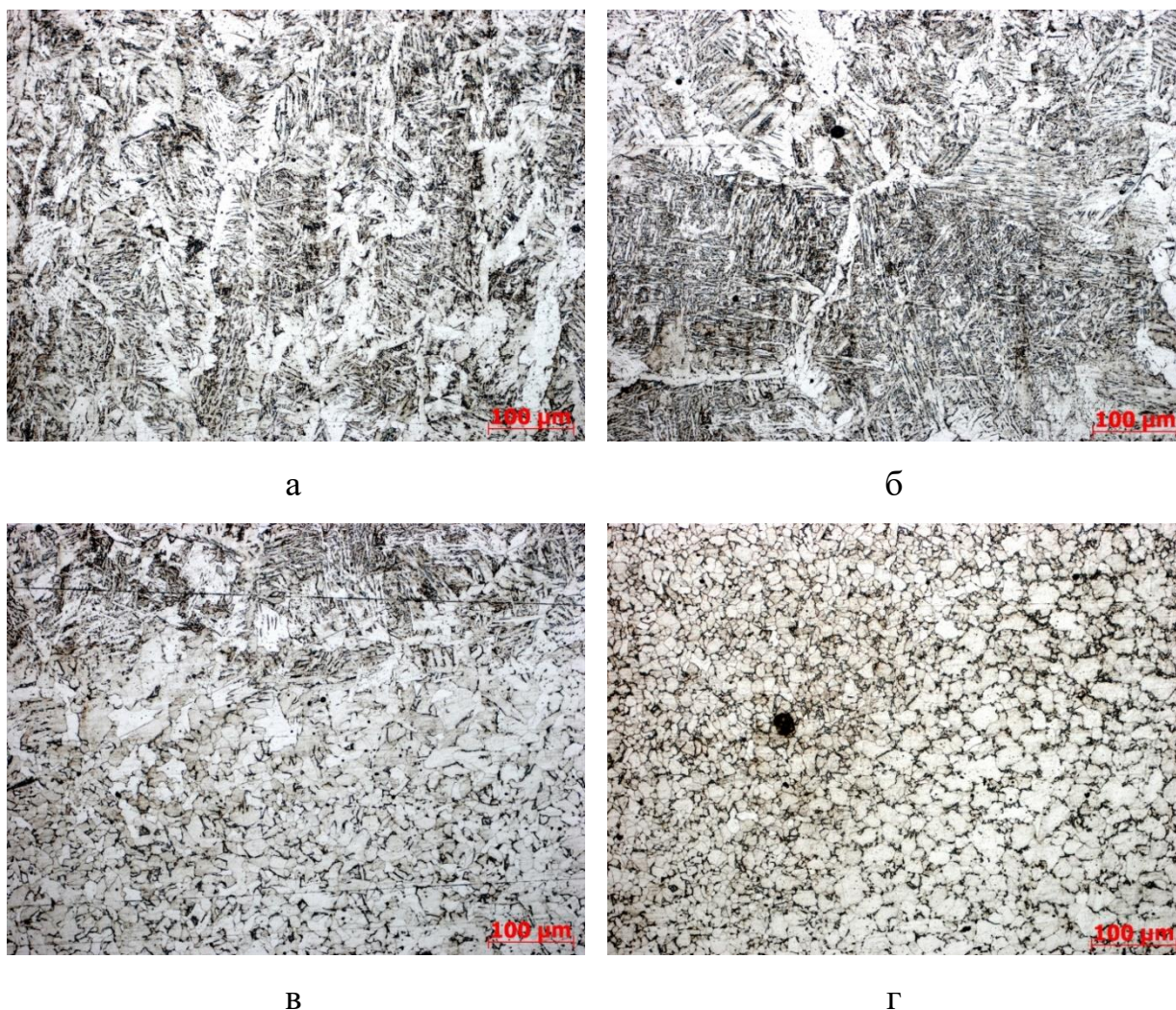


Рис. 3.22. Структура зварного шва, зразок №7: а – зона наплавленого металу, б – ділянка неповного розплавлення і ділянка перегріву, в – межа зон перегріву та нормалізації, г – межа зон нормалізації та основного металу.

3.5.5. Аналіз мікроструктури Зразка №10

Зразок №10 було отримано із застосуванням вібраційної обробки частотою 200 Гц. Зварний шов суцільний, стовпчасті кристали заповнюють весь переріз зони наплавленого металу. Структуру зварного шва представлено на рис. 3.23.

Розмір великих пакетів Видманшетта становить 120-240 мкм. Бал відманшеттової структури в ділянці перегріву зони термічного впливу зварного шва: 4.

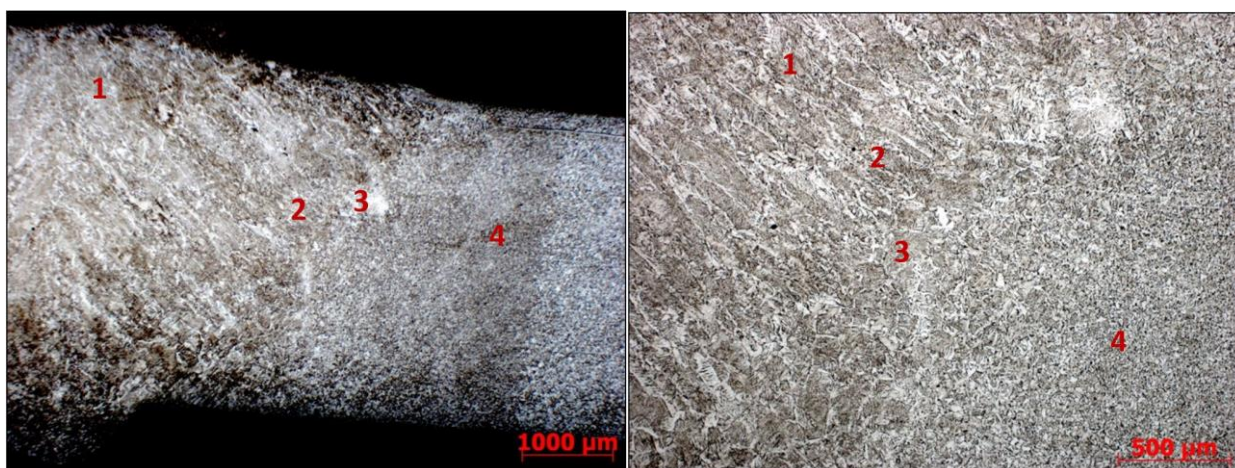


Рис. 3.23. Структура зварного шва, зразок №10: 1 – зона наплавленого металу, 2 – ділянка сплаву, 3 – ділянка перегріву, 4 – ділянка нормалізації.

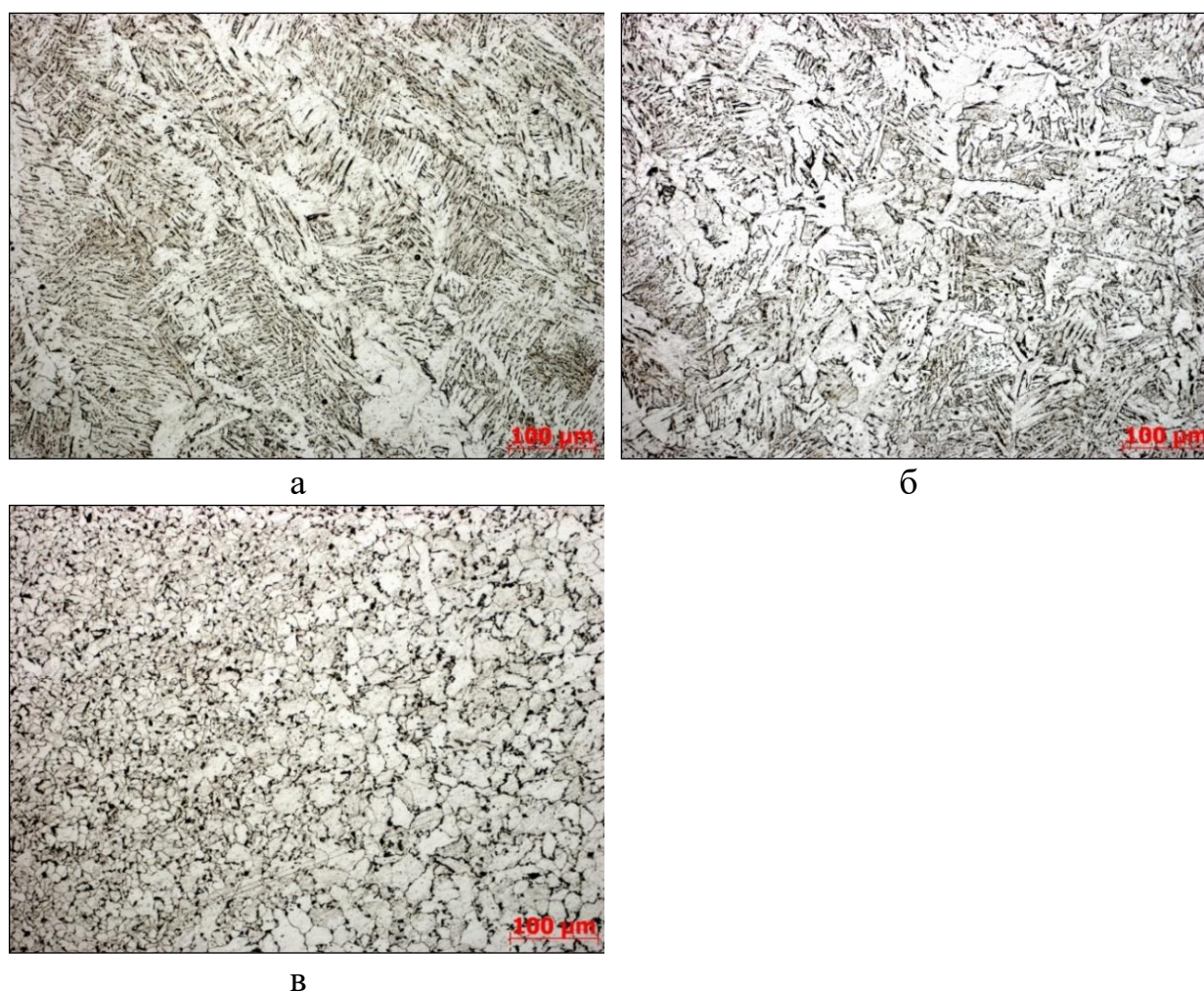


Рис. 3.24. Структура зварного шва, зразок №10: а – зона наплавленого металу, б – ділянки неповного розплавлення і перегріву, в – перехід нормалізованої структури в основний метал.

В ділянці нормалізації розмір зерен фериту становить 10,5 мкм. Ступінь різнозернистості в ділянці нормалізації зони термічного впливу зварного шва становить 0,49. Характерні фото мікроструктур представлені на рис. 3.24.

3.5.6. Обробка результатів експерименту

Більш наочно кількісні відмінності структурних складових експериментальних зразків показані на малюнку 3.25.

Як видно на діаграмах, Зразок №3 характеризується найменшим розміром зерен металу як в ділянці перегріву, так і в ділянці нормалізації. Даний факт кореспондується з дослідженнями в області застосування вібрації в різних технологічних процесах, представленими в підрозділі 2.1 даної роботи.

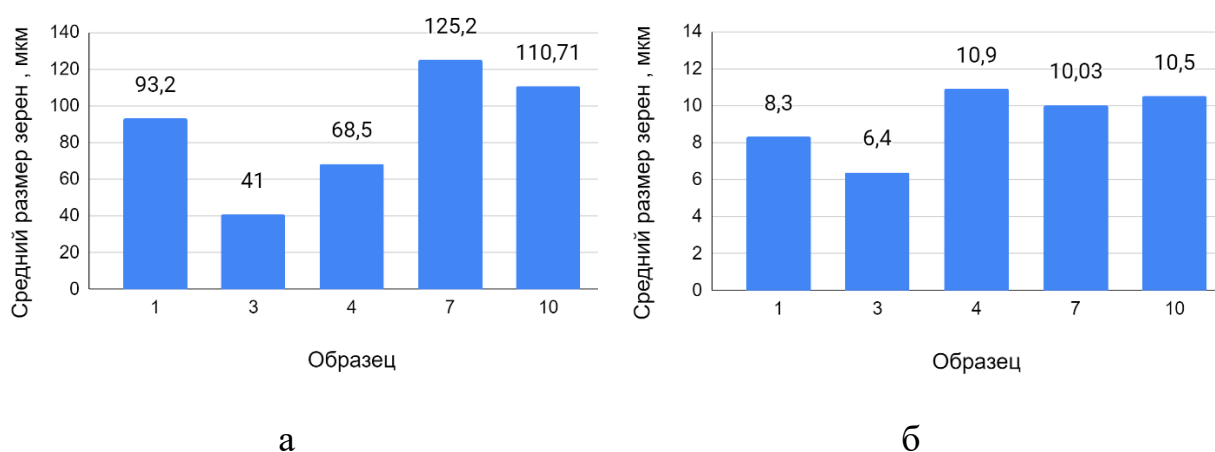


Рис. 3.25. Середній розмір зерен характерних ділянок зони термічного впливу в аналізованих зразках: а – ділянка перегріву (структура Видманштетта), б – ділянка нормалізації (ферито-перлітна структура).

У таблиці 3.23 наведені дані про ступінь розвитку відманштеттової структури ділянки перегріву зварних з'єднань досліджуваних зразків і ступінь різнозернистості ділянки нормалізації.

Ступінь різнозернистості оцінювали за допомогою коефіцієнта варіації згідно методики розробленій Салтиковим С. А. [107] Цей показник розраховується як відношення середньоквадратичного відхилення до

середнього діаметра зерен. Чим вищий коефіцієнт, тим вища неоднорідність і нерівноосність зерен.

Таблиця 3.23. Дані про різнозернистість структури.

Зразок, № п/п	Частота, Гц	Бал відманштеттової структури в ділянці перегріву ЗТВ зварного шва	Ступінь різнозернистості в ділянці нормалізації ЗТВ зварного шва
1	0	2-3	0,44
3	25	1-2	0,41
4	50	2	0,37
7	125	4	0,43
10	200	3	0,49

Основною чутливою до руйнування зоною зварного шва є зона термічного впливу, а саме – ділянка перегріву, внаслідок виникнення в ньому голчастих структур.

Проведення відпалу після зварювання електрозварних труб в діючому технологічному процесі потрібно не тільки для зняття залишкових напружень, а й для подрібнення структури і підвищення її рівномірності.

Чим грубіше структура (в даному випадку, чим вище бал розвитку відманштеттової структури), тим складніше вона усувається при подальшій термічній обробці. Відпал рекристалізації часто повністю не усуває грубу відманштеттову структуру. І в разі усунення спрямованості (голчастим), в місцях перегріву після відпалу може спостерігатися суттєва різнозернистість, яка негативно позначається на міцності і експлуатаційних властивостях зварного виробу. На рис. 3.26 наведено графік залежності рівня різнозернистості структури в ділянці нормалізації від застосованої в процесі зварювання частоти вібрації.

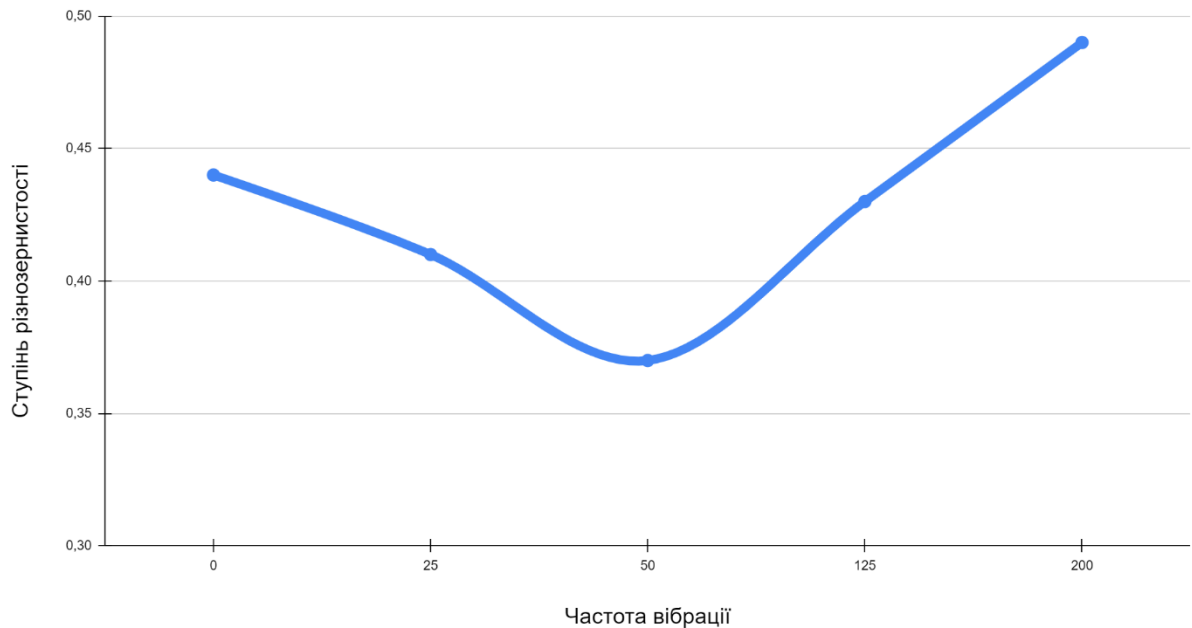


Рис. 3.26. Графік залежності рівня різнозернистості структури від застосованої в процесі зварювання частоти вібрації.

Аналізуючи рис. 3.26 можна зробити висновки, що найбільш однорідна та рівнозерниста структура як в ділянці перегріву, так і в ділянці нормалізації виявлена в зразку №4, звареному з впливом вібрації частотою 50 Гц. Згідно з даними з попереднього розділу, зразок №4 так само характеризується найбільшим відсотком зниження залишкових напружень – 71,41%.

Таким чином можна зробити висновок, що застосування в процесі зварювання вібрації величиною в 50 Гц позитивно впливає як на рівень залишкових напружень, так і на рівномірність структури металу. При цьому необхідно зазначити, що при частоті вібрації 25 Гц (Зразок №3), незважаючи на більш інтенсивне подрібнення зерен, зафіксовані велика різнозернистість і рівень залишкових напружень.

3.6 Експериментальне дослідження впливу вібрації на механічні властивості

З метою визначення впливу вібрації в процесі зварювання на зварений шов прямошовної трубної заготовки були проведені механічні випробування зразків, отриманих в ході експерименту, описаного в підрозділі 3.4.

Виходячи з отриманих раніше результатів дослідження рівня залишкових напружень і мікроструктури зварного шва та біляшовної зони була виділена оптимальна частота вібрації трубної заготовки в процесі зварювання, складова 50 Гц. Для дослідження механічних властивостей були надані дві серії зразків: зварених без застосування вібрації і зварених із застосуванням вібрації частотою 50 Гц.

Деталі машин і механізмів працюють під різними навантаженнями: одні деталі зазнають постійно діючі навантаження в одному напрямку, інші – удари, треті – навантаження, що змінюються за величиною і напрямком. Деякі деталі машин піддаються навантаженням при підвищених або низьких температурах. Тому розроблені різні методи випробувань, за допомогою яких визначають механічні властивості металів. Розрізняють статичні і динамічні випробування.

Статичними називають такі випробування, при яких випробуваний матеріал піддають дії постійного або повільно зростаючого навантаження. Динамічними називають випробування, при яких матеріал піддають дії ударних навантажень.

Найбільш поширеними випробуваннями зварних труб, що характеризують якість зварного шва, є випробування на статичний розтяг і ударну в'язкість.

3.6.1. Випробування на статичний розтяг

Статичне випробування на розтягнення – поширений спосіб механічних випробувань металів. При цих випробуваннях по перетину зразка створюється однорідний напружений стан, матеріал знаходиться під дією нормальних і дотичних напружень. Розтяжне зусилля створює напруження в випробувальному зразку і викликає його подовження. У той момент, коли напруга перевищить міцність зразка, він розірветься.

При дослідженні трубного зварного з'єднання застосовувався Метод випробування на розтягнення кільцевих зразків при нормальній температурі.

Принципова схема проведення випробування на статичний розтяг зварного кільцевого з'єднання представлена на рис. 3.27.

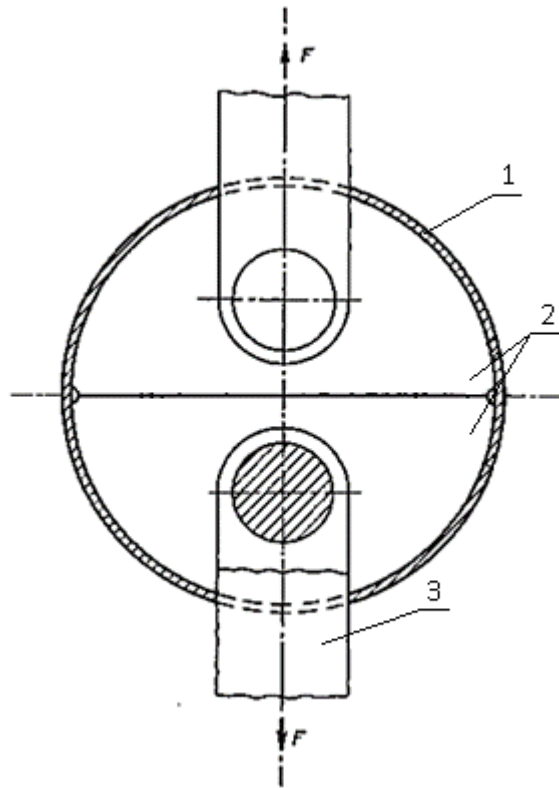


Рис. 3.27. Принципова схема проведення випробування на статичний розтяг зварного кільцевого з'єднання.

У внутрішньому просторі зварного кільцевого зразка 1, що зазнає випробувань, розташовуються напівдиски 2, що представляють собою основний інструмент розтягування. Напівдиски фіксуються і приводяться в рух тягою 3. У процесі випробування діаграмний механізм безперервно реєструє так звану первинну (машинну) діаграму розтягування. На малюнку 3.28 представлені фото зразка до і після випробувань на статичний розтяг.

Для випробувань на статичний розтяг були надані дві серії зразків по три екземпляри в кожній. Ширина кілець для проведення випробувань на статичний розтяг становила 12 мм. При дослідженні зварних швів як правило не проводиться вимір межі плинності, так як цей параметр дорівнює межі плинності основного металу кільцевого зварного з'єднання. Це відбувається за

рахунок порівняно низькою плинністю металу зварного шва. Результати дослідження представлені в таблиці 3.24.

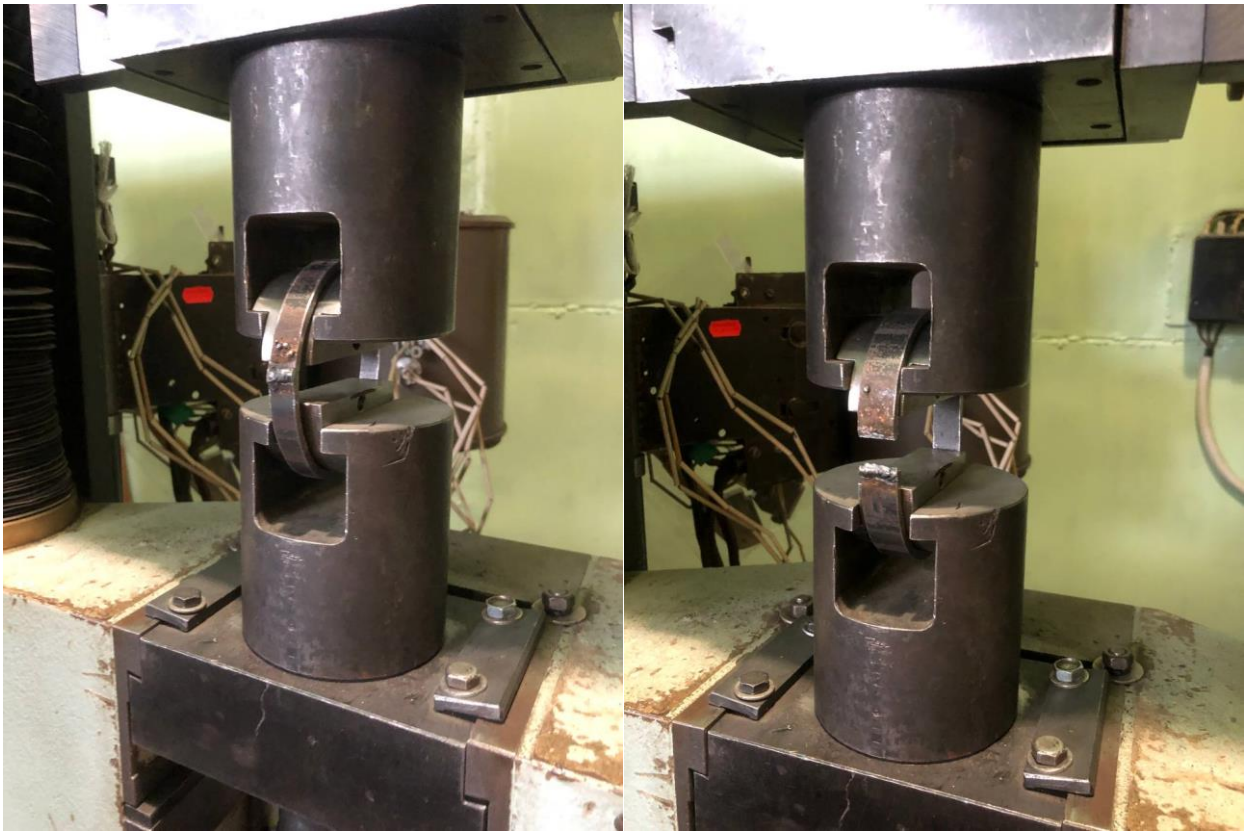


Рис. 3.28. Зразок до і після випробувань на статичний розтяг

Таблиця 3.24. Результати дослідження зразків на розтягнення.

Номер випробування \ Серія зразків	Без вібрації, МПа	З вібрацією 50 Гц, МПа
1 випробування	138	254
2 випробування	148	258
3 випробування	143	250
Середнє значення	143	254

Виходячи з отриманих даних можна зробити висновок про позитивний вплив вібрації на механічні властивості статичного розтягування зварного кільцевого зразка. При застосуванні вібраційної обробки частотою 50 Гц в процесі зварювання виявлено збільшення витримуюмого навантаження на

розрив на 78% в порівнянні з ідентичним зразком, звареним без застосування вібрації.

3.6.2. Випробування на ударну в'язкість (ударний вигин)

Якщо та чи інша деталь машини або механізму в силу свого призначення відчуває ударні навантаження, то метал для виготовлення такої деталі крім статичних випробувань піддають ще динамічним навантаженням, так як деякі метали з досить високими показниками статичної міцності руйнуються при малих ударних навантаженнях. Такими металами є, наприклад, чавун і сталі з грубозернистими структурами.

Для оцінки схильності матеріалів до крихкого руйнування широко застосовують випробування на ударний вигин зразків з надрізом, в результаті яких визначають ударну в'язкість. Ударна в'язкість оцінюється роботою, витраченої на ударний злам зразка, віднесеною до площі його поперечного перерізу в місці надрізу.

ГОСТ 9454-78 передбачає випробування зразків трьох типів:

1. Зразки Шарпі – зразки перетином 10х10 мм, довжиною 55 мм і з U-подібним надрізом шириною і глибиною 2 мм і радіусом 1 мм;
2. Зразки Менаже – зразки того ж перетину і довжини і V-подібним надрізом тієї ж геометрії, що і перший зразок;
3. Т-образні зразки довжиною 55 мм, висотою 11 мм і шириною 10 мм з Т-образним концентратором (надріз, що імітує втомну тріщину).

Основні типи зразків для випробувань на ударну в'язкість представлені на малюнку 3.29.

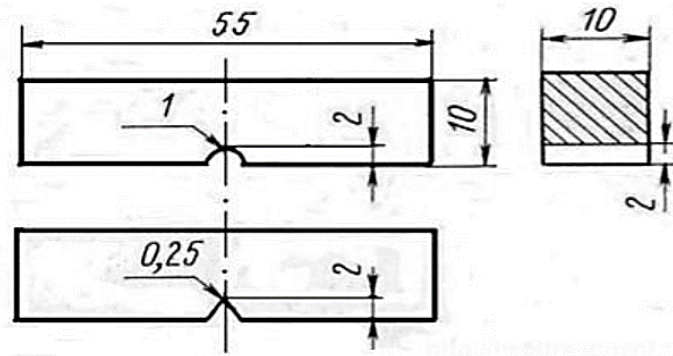


Рис. 3.29. Основні типи зразків для випробувань на ударну в'язкість.

При випробуваннях трубних заготовок, зварених із застосуванням вібрації, були вирізані сегментарні ділянки з рівною відстанню від осі зварного шва, захоплюючи в область дослідження зварений шов та біляшовні зони по обидва боки від осі зварного шва. Схематичне зображення поперечного перерізу зразка для випробувань на ударну в'язкість представлено на рис 3.30.

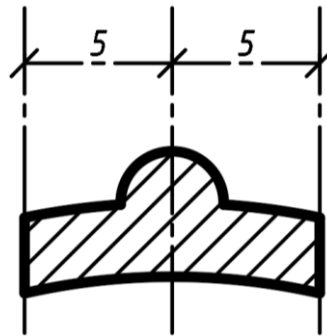


Рис. 3.30. Перетин зразка для випробувань на ударну в'язкість.

Випробування на ударну в'язкість проводилися на маятниковому копрі. Маятник фіксують у вертикальному положенні у верхній частині випробувальної установки і потім звільняють. Маятник, вільно падаючи, вдаряє по зразку і руйнує його, продовжуючи рух по інерції. Робота, витрачена на ударний злам зразка, фіксується на шкалі копра. Схема випробування на ударну в'язкість представлена на рис. 3.31.

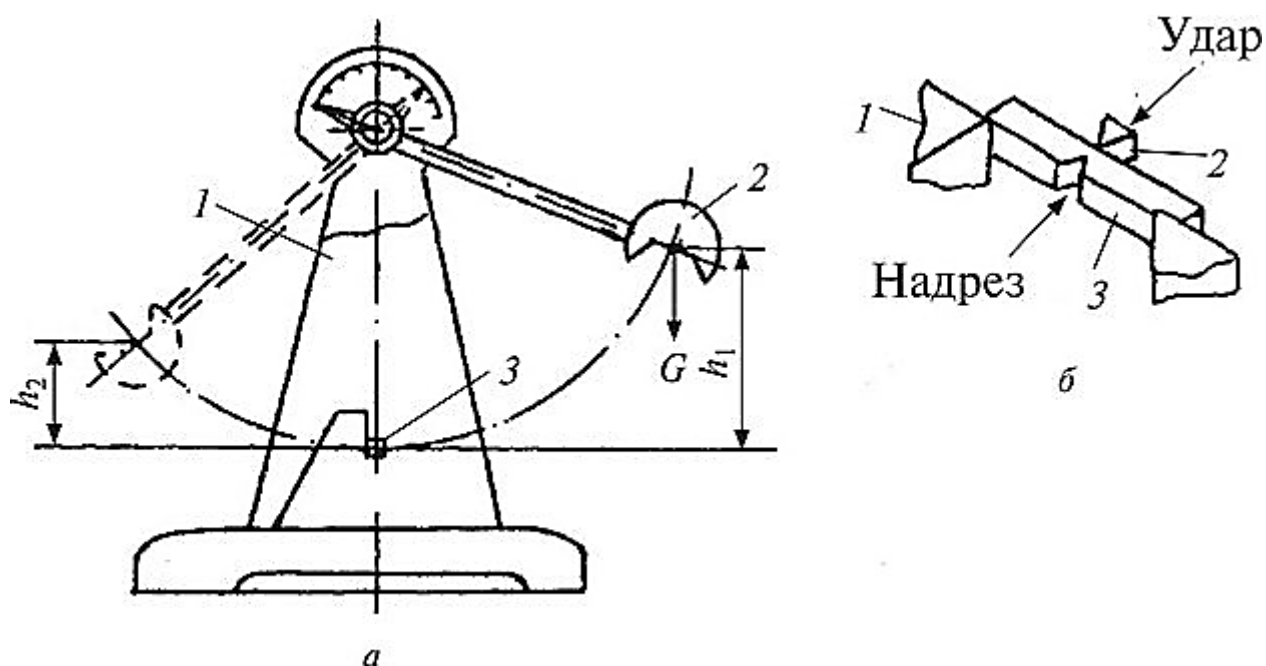


Рис. 3.31. Схема випробування на ударну в'язкість: а – маятниковий копр; б – розташування зразка на копрі; 1 – корпус; 2 – маятник; 3 – зразок.

Для випробувань на ударну в'язкість були надані дві серії зразків по три екземпляри в кожній. Для вивчення впливу вібрації на ударну в'язкість перша серія зразків була зварена із застосуванням вібраційної обробки при зварюванні, а друга серія була зварена без вібрації. Результати дослідження представлені в таблиці 3.25.

Таблиця 3.25. Результати дослідження зразків на ударну в'язкість.

Номер випробування \ Серія зразків	Без вібрації, МПа	З вібрацією 50 Гц, МПа
1 випробування	206	244
2 випробування	208	252
3 випробування	216	254
Середнє значення	210	250

Аналізуючи результати механічних випробувань на ударну в'язкість можна зробити висновок про позитивний вплив вібрації на механічні

властивості зварного шва та біляшовної зони трубної заготовки. При застосуванні вібраційної обробки частотою 50 Гц в процесі зварювання фіксується збільшення показника швидкого поглинання енергії, що вимірюється при випробуваннях на ударний вигин, на 19% в порівнянні з ідентичним зразком, звареним без застосування вібрації.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. На основі математичної моделі, наведеної в другому розділі даної дисертації розроблений і сконструйований вібраційний стіл для експериментальної обробки зразків трубних заготовок згідно з технологією, яка передбачає зниження залишкових напружень при застосуванні в процесі зварювання труб. Згідно з розрахунками, підібрано вібратор електромеханічний майданчикového типу моделі ЕВ-1000 з можливістю частотного регулювання від 0 до 200 Гц.

2. Проведений експеримент дозволив виявити закономірності зміни рівня залишкових напружень при зварюванні трубних заготовок марки ЗПС із застосуванням вібрації різних частот. Встановлено, що при впливі вібрації частотою 50 Гц в процесі зварювання відбувається зниження залишкових напружень в зварному шві та біляшовній зоні на 71,41%.

3. Дослідження мікроструктури зварних швів заготовок марки ЗПС показало, що найменша величина зерна зафіксована в зразку, звареному із застосуванням вібрації частотою 25 Гц. Розмір зерна в даному зразку склав 41 мкм в ділянці перегріву і 6,4 мкм в ділянці нормалізації.

4. Найбільш однорідна і рівнозерниста мікроструктура виявлена в зразку трубних заготовок марки ЗПС, звареному із застосуванням вібрації частотою 50 Гц. Бал відманштеттової структури в ділянці перегріву ЗТВ зварного шва склав 2 бали. Ступінь різнозернистості в ділянці нормалізації – 0,37.

5. Проведено механічні випробування трубних заготовок марки ЗПС, зварених із застосуванням вібрації частотою 50 Гц і без вібраційної обробки. Зразки піддавалися випробуванням на статичний розтяг і ударну в'язкість. Дослідження показали позитивний ефект застосування вібрації: показник статичного розтягування збільшився на 78%, а ударної в'язкості на 19%.

6. Матеріали третього розділу опубліковані в роботах [96-98].

РОЗДІЛ 4. ВЕРИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ І ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ЗВАРНИХ ТРУБ

4.1. Оцінка достовірності експериментальних вимірювань рівня залишкових напружень

В основі досліджень, описаних в розділі 3, лежать методи математичної теорії експерименту, що дозволяють досліджувати і оптимізувати складні сукупності об'єктів, забезпечуючи необхідну точність визначення досліджуваних незалежних параметрів.

До концепціям теорії математичного експерименту відносяться концепції рандомізації, послідовного експерименту, математичного моделювання, оптимального використання факторного простору і деякі інші. Для верифікації результатів досліджень, описаних в розділах 2 і 3, обрана концепція математичного моделювання як найбільш прийнятна для теоретичних результатів.

Концепція математичного моделювання передбачає отримання в результаті експерименту рівняння регресії у вигляді деякого закону, який із заданим ступенем точності характеризує явище в деякій обмеженій області факторного простору, при цьому його адекватність можна оцінити за критерієм Фішера.

На етапі планування експерименту описувалася методика його проведення, а також визначалися параметри вимірювань, технічні засоби, допустима похибка експериментальних даних.

Повна похибка результату вимірювань складається з суми п'яти приватних похибок: методу, установки, інструментальної, суб'єктивної і обробки даних. Кожна з цих приватних похибок містить і систематичну, і випадкову складові.

Методичні похибки виникають в результаті наступних дій [99]:

- викривлення стану об'єкта при взаємодії його з застосовуваними засобами вимірювальної техніки;

- недообліку деяких залежностей або використання наближеної математичної моделі досліджуваного об'єкта;
- недостатньою індивідуалізацією самого об'єкта вимірювання.

Інструментальні похибки викликаються конструктивними недоліками засобів вимірювань, фіксуються в їх паспортах.

Похибки установки визначаються неправильним розташуванням засобів вимірювань щодо джерел перешкод. До суб'єктивних похибок відносяться: запізнювання або випередження реєстрації сигналу; недостатній окомір, порушення послідовності операцій.

Суб'єктивні похибки пов'язані з індивідуальним станом самого експериментатора, тому зазвичай припускають, що суб'єктивними похибками в першому наближенні можна знехтувати.

Похибки обробки даних залежать від обраного методу, алгоритму обробки результатів спостережень і правильності всіх обчислень.

Всі ці похибки мають вплив на результати представленого в даній дисертаційній роботі експерименту зі зварювання трубних заготовок із застосуванням різних частот вібрації і в тій чи іншій мірі спотворюють кінцеві дані.

Під верифікацією математичного моделювання слід розуміти підбір математичної моделі, а далі за допомогою спеціалізованого програмного комплексу порівняння результатів розрахунку з експериментальними даними.

Величина x , що представляє собою результат експерименту, є, як правило, випадковою величиною, змінюється від експерименту до експерименту, може бути дискретною або неперервною. Провівши досвід n -ну кількість разів, отримуємо вибірку, що складається з кінцевого числа значень випадкової величини. Число n називається об'ємом вибірки.

Основними параметрами вибірки є [99]:

- середнє арифметичне (середнє) $\bar{x}$:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.1)$$

– середньоквадратична похибка (відхилення) S_n :

$$S_n = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2} \quad (4.2)$$

– середньоквадратична похибка середнього:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.3)$$

де $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$.

Основним завданням попередньої обробки експериментальних даних є виключення грубих помилок, оцінка точності вимірювань, розрахунок довірчого інтервалу і підбір емпіричних формул по графічним залежностям.

Проведення різних технічних досліджень пов'язаних з набором масивів експериментальних даних, які можуть містити грубі помилки, виключити які можна за допомогою критеріальних оцінок, основними з яких є критерій Шовен, критерій β і критерій Кохрена.

Згідно з даними з літературних джерел [100,101], при наявній в розглянутому дослідженні кількості експериментів найбільш раціональним є застосування при оцінці збіжності результатів схеми Кохрена.

Оцінити доброякісність і збіжність вимірювань можна за допомогою схеми критерію Кохрена [101], використовуючи вираз:

$$G_{расч} = \frac{S_{y_{max}}^2}{\sum S_{y_i}^2} \quad (4.4)$$

де $S_{y_{\max}}^2$ – максимальна з підрядкових дисперсій; $\sum S_{y_i}^2$ – сума всіх дисперсій вибірки.

Для початку виконується порівняння $G_{\text{розр}}$ з $G_{\text{табл}}$ (табличні значення для обраної довірчої ймовірності p і числа ступенів свободи $f = n - 1$). Якщо $G_{\text{табл}} > G_{\text{розр}}$, то дисперсії вважаються однорідними.

Оцінимо достовірність експериментальних вимірювань рівня залишкових напружень, наведених в третьому розділі даної дисертації, за критерієм Кохрена. У таблиці 4.1 представлені необхідні для проведення розрахунку дані.

Побудуємо таблицю експериментальних значень рівня залишкових напружень (табл.4.1).

Таблиця 4.1. Розрахункові дані для схеми критерію Кохрена.

Номер експерименту	Значення, y_i	Абсолютне відхилення, $y_i - \bar{y}$	Квадрат середньоквадратичного відхилення, $S_y^2 = \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n-1}$
1	4,37	0,22	0,0054
2	4,35	0,2	0,0044
3	4,22	0,07	0,0005
4	4,3	0,15	0,0025
5	4,22	0,07	0,0005
6	3,98	-0,17	0,0032
7	3,96	-0,19	0,004
8	3,97	-0,18	0,0036
9	4,15	0	0
10	3,98	0,17	0,0032
Сума	41,5	0,34	0,0273
Середнє	4,15	0,034	0,00273

За рівняння (4.4) знайдемо розрахунковий критерій $G_{\text{розр}}$:

$$G_{\text{розр}} = \frac{0,005}{0,0273} = 0,1832.$$

У таблиці критичних точок розподілу Кохрена [101] знаходимо для довірчої ймовірності 0,95, числа ступенів свободи $f = n - 1 = 10 - 1 = 9$, табличне значення критерію Кохрена $G_{\text{табл}} = 0,2439$. Дисперсії однорідні, так як $G_{\text{табл}} > G_{\text{розр}}$. Даний факт говорить про те, що похибка не значна і дозволяє працювати з масивом експериментально отриманих даних.

4.2. Апроксимація результатів експериментальних досліджень на основі побудови функціональної залежності

З метою зіставлення результатів експериментальних досліджень з теоретичними результатами, розрахованими за допомогою математичної моделі трубного зварного з'єднання підданого вібраційному впливу, була побудована криволінійна регресійна модель, що описує функціональну залежність між експериментальними значеннями.

Побудова функціональної залежності за результатами експериментальних досліджень за допомогою криволінійної регресії дозволяє з певною похибкою розрахувати значення досліджуваного параметра в будь-якій точці діапазону проведених експериментів.

В експериментальних дослідженнях через велику кількість вимірювань і впливу різних чинників, які неможливо врахувати, спостерігається значний розкид даних, що не дозволяє встановити функціональну залежність. Функціональна залежність встановлюється, якщо кожному значенню змінної X відповідає одне, і тільки одне, значення Y . Якщо цього не відбувається, то має місце лише кореляційна залежність, і визначення коефіцієнтів емпіричних формул зводиться до вибору значень, при яких знайдена залежність розташовується до звітним точкам найбільш близько.

У металургійних дослідженнях часто потрібно оцінити достовірність впливу будь-яких чинників, які можуть бути враховані лише кількісно. Для вирішення подібних завдань застосовуються лінійні і нелінійні регресії [100]. У разі експериментального дослідження зі зварювання трубних заготовок із застосуванням вібрації в зв'язку з великою кількістю чинників, що впливають на процес, має місце нелінійна регресія.

Нелінійні регресії діляться на два класи: регресії, нелінійні щодо включених в аналіз змінних, що пояснюють, але лінійні по оцінюваним параметрами, і регресії, нелінійні по оцінюваним параметрам.

Побудова рівняння регресії зводиться до оцінки її параметрів. Для оцінки параметрів регресій, лінійних за параметрами, використовують метод найменших квадратів (МНК). Оцінку якості побудованої моделі для нелінійної регресії дає середня помилка апроксимації $\bar{A}$.

Середня помилка апроксимації є середнє відхилення розрахункових значень від фактичних і обчислюється за формулою [100]:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y - y_x}{y} \right| \cdot 100\% \quad (4.5)$$

Перевірити значимість рівняння регресії означає – встановити, чи відповідає математична модель, що виражає залежність між змінними, експериментальними даними і чи достатньо включених в рівняння змінних, що пояснюють, для опису залежною змінною.

У разі конкретного, розглянутого в даній роботі експерименту лінійна апроксимація статистичної залежності між двома величинами не відображає характер залежності, тому прийнято рішення використовувати модель криволінійної кореляції. Однією з найпоширеніших є параболічна кореляція другого порядку, при якій рівняння регресії Y на X має вигляд [100]:

$$y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 \quad (4.6)$$

де a_0, a_1, a_2 – невизначені коефіцієнти.

Коефіцієнти регресії a_0, a_1, a_2 знайдемо з умови мінімуму функціонала (4.6).

У таблиці 4.2 наведені значення параметрів, отримані в ході експериментального дослідження трубних зразків, зварених із застосуванням

вібрації. При вимірюванні залишкової напруженості застосовувався метод магнітної пам'яті металів.

Таблиця 4.2. Значення параметрів, отримані в ході експерименту.

Номер зразка	Значення K_{cp} , А/м ²	Частота, Гц	Залишкові напруження, МПа
1	10,307	0	145
2	7,204	10	101,35
3	5,604	25	78,84
4	2,947	50	41,46
5	2,968	75	41,75
6	3,951	100	55,58
7	4,74	125	66,68
8	5,518	150	77,63
9	6,075	175	85,46
10	6,001	200	84,42

Для значень параметрів, отриманих в ході експерименту, побудуємо кореляційну модель. Представлені в таблиці значення зіставлені з проведеними раніше рентгеноскопичними дослідженнями залишкових напружень і виведені взаємозв'язки значення K_{cp} з абсолютними величинами залишкових напружень, вимірюваними в МПа.

Для коректної побудови функціональної залежності необхідний рівний проміжок між досліджуваними значеннями. Значення зразка №2 вибивається із загальної послідовності і не буде використовуватися в подальших розрахунках. Також для зіставлення експериментальних значень з теоретичними не береться зразок №1, так як він зварений без застосування вібрації і розрахунок залишкових напружень даного зразка за допомогою математичної моделі, представленої в другому розділі даної дисертації, надав би некоректні дані.

Для порівняння точності математичної моделі з експериментально отриманими даними необхідно:

1. Побудувати криволінійне рівняння регресії y по x .
2. Для оцінки сили кореляції обчислимо середню помилку апроксимації.

Минимальное значение функция y достигает при $x=50$. Продифференцировав (4.6) по переменной x и приравняв полученное выражение к нулю, получим соотношение для a_1 : $a_1 = -2a_2$. Используя значения переменных из таблицы 4.1, получим уравнение регрессии в виде:

Мінімальне значення функція y досягає при $x=50$. Продиференціювавши (4.6) по змінній x і прирівнявши отриманий вираз до нуля, отримаємо співвідношення для a_1 : $a_1 = -2a_2$. Використовуючи значення змінних з таблиці 4.1, отримаємо рівняння регресії у вигляді:

$$y = 0,0004 x^2 - 0,04 \cdot x + 3,951.$$

Заповнюємо таблицю 4.3.

Таблиця 4.3. Результати розрахунку параметрів рівняння криволінійної регресії.

Номер зразку	Частота вібрації	Експериментальні значення	Регресивні значення
3	25	78,84	45,03
4	50	41,46	41,51
5	75	41,75	45,03
6	100	55,58	55,58
7	125	66,68	73,17
8	150	77,63	97,79
9	175	85,46	129,44
10	200	84,42	168,13
Сума	900	531,83	655,69
Середнє	112,5	66,48	81,96

Якість моделі визначає середня помилка апроксимації (4.5)

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y - y_x}{y} \right| \cdot 100\% = \frac{1}{8} \sum \left| \frac{66,48 - 81,96}{66,48} \right| \cdot 100\% = 2,209\%.$$

Якість побудованої моделі оцінюється як хороша, так як A не перевищує 10%.

4.3. Розрахунки згідно математичної моделі трубного зварного з'єднання, підданого вібраційному впливу

Застосувавши математичну модель трубного зварного з'єднання, підданого вібраційному впливу, наведену в другому розділі даної дисертації, можна теоретично розрахувати середню величину залишкових напружень, що містяться в звареному шві та біляшовній зоні.

Для коректного розрахунку рівня залишкових напружень в конкретному зразку необхідна наступна інформація про об'єкт, що оброблюється, та технологічний процес: власна частота вібрації оброблюемого зразка; логарифмічний декремент загасання коливань оброблюемого зразка; амплітуда і частота змушуючої сили вібрації, що впливає на зразок.

Мінімальна паспортна амплітуда змушуючих коливань застосовуваної майданчикової вібраційної установки становить 0,5 мм, однак, з огляду на масу вібраційного столу, амплітуда коливань розсіюється в обсязі матеріалу і до оброблюваного зразку доходить амплітуда коливань рівна 0,05 мм. Для розрахунків оптимальної частоти вібрації дана величина буде застосовуватися в мікронах – 50 мкм.

Власною частотою коливань є набір характерних для коливальної системи типів гармонічних коливань. Кожне з нормальних коливань фізичної системи, таких як коливання атомів в молекулах, характеризується своєю частотою. Така частота називається нормальної або власною частотою коливань частки [102].

Згідно з наведеними в відомих дослідженнях [53] даними, власна частота коливань для марки стали ЗПС, застосовуваної в експерименті зі зварювання трубних заготовок із застосуванням вібрації, приймається рівною 8,3 Гц.

Логарифмічний декремент загасання коливань – це безрозмірна фізична величина, що описує зменшення амплітуди коливального процесу. Зворотна

числу коливань, після закінчення яких амплітуда коливань зменшиться в e разів [103].

Згідно з проведеними раніше експериментальними дослідженнями демпфуючих характеристик зразків із сталей і сплавів [104], логарифмічний декремент загасання коливань для різних марок сталей розташовується в діапазоні від 0,22 до 0,24.

Час вібраційного впливу розраховується за формулою, представленої в другому розділі даної дисертації, заснованої на швидкості затвердіння металу:

$$t_{\text{вібр}} = \frac{1500 - 600}{2 * 0,468 * 45,4 * 0,468 * 7,6 * \frac{(1500-20)^3}{\left(\frac{3486}{0,26725^4}\right)^2}} = 5 \text{ сек.}$$

Нижче наведені теоретичні розрахунки рівня залишкових напружень згідно математичної моделі трубного зварного з'єднання, схильного вібраційному впливу. Розрахунки проводилися за вісьмома зразкам, звареними із застосуванням вібрації частотою від 25 Гц до 200 Гц з кроком 25 Гц для зіставлення отриманих результатів з експериментальними і регресійний значеннями.

Виходячи з параметрів матеріалу і особливостей технологічного процесу для розрахунків був обраний третій варіант математичної моделі, при якому логарифмічний декремент загасання коливань, що лежить в діапазоні від 0,22 до 0,24, нижче власної частоти вібрації, що дорівнює для даної марки стали 8,6 Гц.

Зразок №3. Частота змушуючої сили вібрації – 25 Гц.

$$\begin{aligned}
y_{III} = e^{-0,22 \cdot 5} & \left(-\frac{2 \cdot 0,22 \cdot 25 \cdot 50}{4 \cdot 0,22^2 \cdot 25^2 + (25^2 - 8,6^2)^2} \cdot \cos \sqrt{\tilde{D}} \cdot 5 - \right. \\
& - \frac{50 \cdot 25^2 \cdot (25^2 - 8,6^2) + 2 \cdot 0,22^2 \cdot 25 \cdot 50}{4 \cdot 0,22^2 \cdot 25^2 + (25^2 - 8,6^2)^2} \cdot \sin \sqrt{\tilde{D}} \cdot 5) + \\
& + \frac{2 \cdot 0,22 \cdot 25 \cdot 50}{4 \cdot 0,22^2 \cdot 25^2 + (25^2 - 8,6^2)^2} \cdot \cos(25 \cdot 5) + \\
& + \frac{50 \cdot (25^2 - 8,6^2)}{4 \cdot 0,22^2 \cdot 25^2 + (25^2 - 8,6^2)^2} \cdot \sin(25 \cdot 5) = 63,23 \text{ МПа}
\end{aligned}$$

Зразок №4. Частота змушуючої сили вібрації – 50 Гц.

$$\begin{aligned}
y_{III} = e^{-0,22 \cdot 5} & \left(-\frac{2 \cdot 0,22 \cdot 50 \cdot 50}{4 \cdot 0,22^2 \cdot 50^2 + (50^2 - 8,6^2)^2} \cdot \cos \sqrt{\tilde{D}} \cdot 5 - \right. \\
& - \frac{50 \cdot 50^2 \cdot (50^2 - 8,6^2) + 2 \cdot 0,22^2 \cdot 50 \cdot 50}{4 \cdot 0,22^2 \cdot 50^2 + (50^2 - 8,6^2)^2} \cdot \sin \sqrt{\tilde{D}} \cdot 5) + \\
& + \frac{2 \cdot 0,22 \cdot 50 \cdot 50}{4 \cdot 0,22^2 \cdot 50^2 + (50^2 - 8,6^2)^2} \cdot \cos(50 \cdot 5) + \\
& + \frac{50 \cdot (50^2 - 8,6^2)}{4 \cdot 0,22^2 \cdot 50^2 + (50^2 - 8,6^2)^2} \cdot \sin(50 \cdot 5) = 36,92 \text{ МПа}
\end{aligned}$$

Зразок №5. Частота змушуючої сили вібрації – 75 Гц.

$$\begin{aligned}
y_{III} = e^{-0,22 \cdot 5} & \left(-\frac{2 \cdot 0,22 \cdot 75 \cdot 50}{4 \cdot 0,22^2 \cdot 75^2 + (75^2 - 8,6^2)^2} \cdot \cos \sqrt{\tilde{D}} \cdot 5 - \right. \\
& - \frac{50 \cdot 75^2 \cdot (75^2 - 8,6^2) + 2 \cdot 0,22^2 \cdot 75 \cdot 50}{4 \cdot 0,22^2 \cdot 75^2 + (75^2 - 8,6^2)^2} \cdot \sin \sqrt{\tilde{D}} \cdot 5) + \\
& + \frac{2 \cdot 0,22 \cdot 75 \cdot 50}{4 \cdot 0,22^2 \cdot 75^2 + (75^2 - 8,6^2)^2} \cdot \cos(75 \cdot 5) + \\
& + \frac{50 \cdot (75^2 - 8,6^2)}{4 \cdot 0,22^2 \cdot 75^2 + (75^2 - 8,6^2)^2} \cdot \sin(75 \cdot 5) = 38,38 \text{ МПа}
\end{aligned}$$

Зразок №6. Частота змушуючої сили вібрації – 100 Гц.

$$\begin{aligned}
y_{III} = e^{-0,235 \cdot 5} & \left(-\frac{2 \cdot 0,235 \cdot 100 \cdot 50}{4 \cdot 0,235^2 \cdot 100^2 + (100^2 - 8,6^2)^2} \cdot \cos \sqrt{\bar{D}} \cdot 5 - \right. \\
& - \frac{50 \cdot 100^2 \cdot (100^2 - 8,6^2) + 2 \cdot 0,235^2 \cdot 100 \cdot 50}{4 \cdot 0,235^2 \cdot 100^2 + (100^2 - 8,6^2)^2} \cdot \sin \sqrt{\bar{D}} \cdot 5) + \\
& + \frac{2 \cdot 0,235 \cdot 100 \cdot 50}{4 \cdot 0,235^2 \cdot 100^2 + (100^2 - 8,6^2)^2} \cdot \cos(100 \cdot 5) + \\
& + \frac{50 \cdot (100^2 - 8,6^2)}{4 \cdot 0,235^2 \cdot 100^2 + (100^2 - 8,6^2)^2} \cdot \sin(100 \cdot 5) = 54,11 \text{ МПа}
\end{aligned}$$

Зразок №7. Частота змушуючої сили вібрації – 125 Гц.

$$\begin{aligned}
y_{III} = e^{-0,24 \cdot 5} & \left(-\frac{2 \cdot 0,24 \cdot 125 \cdot 50}{4 \cdot 0,24^2 \cdot 125^2 + (125^2 - 8,6^2)^2} \cdot \cos \sqrt{\bar{D}} \cdot 5 - \right. \\
& - \frac{50 \cdot 125^2 \cdot (125^2 - 8,6^2) + 2 \cdot 0,24^2 \cdot 125 \cdot 50}{4 \cdot 0,24^2 \cdot 125^2 + (125^2 - 8,6^2)^2} \cdot \sin \sqrt{\bar{D}} \cdot 5) + \\
& + \frac{2 \cdot 0,24 \cdot 125 \cdot 50}{4 \cdot 0,24^2 \cdot 125^2 + (125^2 - 8,6^2)^2} \cdot \cos(125 \cdot 5) + \\
& + \frac{50 \cdot (125^2 - 8,6^2)}{4 \cdot 0,24^2 \cdot 125^2 + (125^2 - 8,6^2)^2} \cdot \sin(125 \cdot 5) = 84,18 \text{ МПа}
\end{aligned}$$

Зразок №8. Частота змушуючої сили вібрації – 150 Гц.

$$\begin{aligned}
y_{III} = e^{-0,24 \cdot 5} & \left(-\frac{2 \cdot 0,24 \cdot 150 \cdot 50}{4 \cdot 0,24^2 \cdot 150^2 + (150^2 - 8,6^2)^2} \cdot \cos \sqrt{\bar{D}} \cdot 5 - \right. \\
& - \frac{50 \cdot 150^2 \cdot (150^2 - 8,6^2) + 2 \cdot 0,24^2 \cdot 150 \cdot 50}{4 \cdot 0,24^2 \cdot 150^2 + (150^2 - 8,6^2)^2} \cdot \sin \sqrt{\bar{D}} \cdot 5) + \\
& + \frac{2 \cdot 0,24 \cdot 150 \cdot 50}{4 \cdot 0,24^2 \cdot 150^2 + (150^2 - 8,6^2)^2} \cdot \cos(150 \cdot 5) + \\
& + \frac{50 \cdot (150^2 - 8,6^2)}{4 \cdot 0,24^2 \cdot 150^2 + (150^2 - 8,6^2)^2} \cdot \sin(150 \cdot 5) = 112,52 \text{ МПа}
\end{aligned}$$

Зразок №9. Частота змушуючої сили вібрації – 175 Гц.

$$\begin{aligned}
y_{III} = e^{-0,24 \cdot 5} & \left(- \frac{2 \cdot 0,24 \cdot 175 \cdot 50}{4 \cdot 0,24^2 \cdot 175^2 + (175^2 - 8,6^2)^2} \cdot \cos \sqrt{\bar{D}} \cdot 5 - \right. \\
& - \frac{50 \cdot 175^2 \cdot (175^2 - 8,6^2) + 2 \cdot 0,24^2 \cdot 175 \cdot 50}{4 \cdot 0,24^2 \cdot 175^2 + (175^2 - 8,6^2)^2} \cdot \sin \sqrt{\bar{D}} \cdot 5) + \\
& + \frac{2 \cdot 0,24 \cdot 175 \cdot 50}{4 \cdot 0,24^2 \cdot 175^2 + (175^2 - 8,6^2)^2} \cdot \cos(175 \cdot 5) + \\
& + \frac{50 \cdot (175^2 - 8,6^2)}{4 \cdot 0,24^2 \cdot 175^2 + (175^2 - 8,6^2)^2} \cdot \sin(175 \cdot 5) = 125,09 \text{ МПа}
\end{aligned}$$

Зразок №10. Частота змушуючої сили вібрації – 200 Гц.

$$\begin{aligned}
y_{III} = e^{-0,24 \cdot 5} & \left(- \frac{2 \cdot 0,24 \cdot 200 \cdot 50}{4 \cdot 0,24^2 \cdot 200^2 + (200^2 - 8,6^2)^2} \cdot \cos \sqrt{\bar{D}} \cdot 5 - \right. \\
& - \frac{50 \cdot 200^2 \cdot (200^2 - 8,6^2) + 2 \cdot 0,24^2 \cdot 200 \cdot 50}{4 \cdot 0,24^2 \cdot 200^2 + (200^2 - 8,6^2)^2} \cdot \sin \sqrt{\bar{D}} \cdot 5) + \\
& + \frac{2 \cdot 0,24 \cdot 200 \cdot 50}{4 \cdot 0,24^2 \cdot 200^2 + (200^2 - 8,6^2)^2} \cdot \cos(200 \cdot 5) + \\
& + \frac{50 \cdot (200^2 - 8,6^2)}{4 \cdot 0,24^2 \cdot 200^2 + (200^2 - 8,6^2)^2} \cdot \sin(200 \cdot 5) = 116,51 \text{ МПа}
\end{aligned}$$

Отримані в ході побудови математичних моделей дані представлені в таблиці 4.4.

На рис. 4.1 представлені графіки залежностей рівня залишкових напружень від частоти застосовуваного в процесі зварювання вібраційного впливу, побудовані за експериментальними даними, теоретичними даними, розрахованим по математичній моделі трубного зварного з'єднання підданого вібраційному впливу, і формулами криволінійної регресії.

Таблиця 4.4. Результати розрахунку математичної моделі.

Номер зразку	Частота вібрації, Гц	Експериментальні залишкові напруження, МПа	Регресивні залишкові напруження, МПа	Теоретичні залишкові напруження, МПа
3	25	78,84	45,03	63,23
4	50	41,46	41,51	36,92
5	75	41,75	45,03	38,38
6	100	55,58	55,58	54,11
7	125	66,68	73,17	84,18
8	150	77,63	97,79	112,52
9	175	85,46	129,44	125,09
10	200	84,42	168,13	116,50

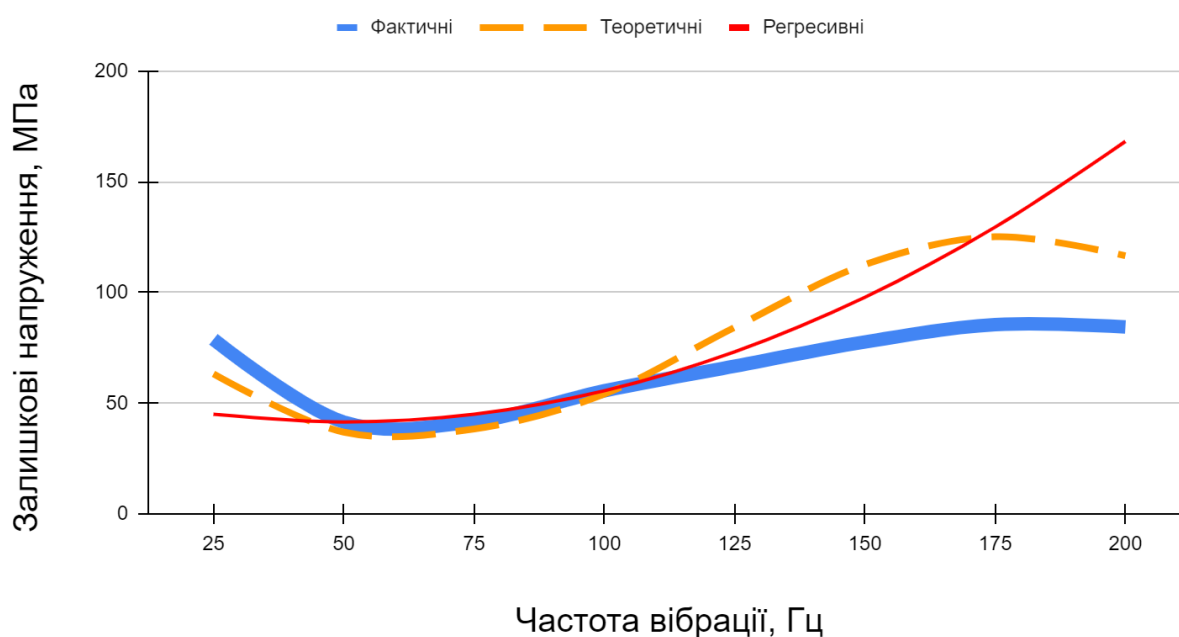


Рис. 4.1. Експериментальні, теоретичні та регресивні дані про залишкові напруження

Виходячи з отриманих даних можна зробити висновок про коректність виконаних розрахунків. Тенденція зміни результатів, розрахованих згідно

математичної моделі трубного зварного з'єднання, схильного вібраційному впливу, збігається з тенденцією зміни експериментально отриманих значень.

Опис функціональної залежності за допомогою криволінійної регресії і математична модель трубного зварного з'єднання, підданого вібраційному впливу, дають зіставні по точності результати. Середнє відхилення криволінійної регресії від експериментальних значень становить 29,65%, а математичної моделі трубного зварного з'єднання, підданого вібраційному впливу – 24,63%. При цьому в ділянці резонансного піку вібраційного впливу, що знаходиться в діапазоні 50-100 Гц, похибка математичної моделі становить 7,23%.

Однак при побудові регресійної залежності необхідний масив даних, отриманих в ході серії експериментів із застосуванням конкретного матеріалу і виконанням унікальних технологічних умов виробництва, в той час як математична модель трубного зварного з'єднання, підданого вібраційному впливу, дає можливість розрахувати передбачувані залишкові напруження в зварному шві трубної заготовки, звареної із застосуванням вібрації, спираючись тільки на дані про матеріал, що оброблюється, та особливості технологічного процесу, без необхідності проведення фізичних експериментів.

4.4. Удосконалення технологічного процесу виробництва зварних труб із застосуванням вібраційної обробки

На основі теоретичних досліджень, проведених у другому розділі, і практичних стендових експериментів, представлених в третьому розділі даної дисертації, розроблений і запатентований можливий варіант застосування вібраційної обробки при виробництві зварних труб з метою зняття залишкових напружень і поліпшення якості зварного шва та біляшовної зони.

Для прикладу розглянуто один з найпоширеніших способів виробництва зварних труб – трубоелектрозварювальний агрегат безперервного типу для виробництва труб малого і середнього діаметра методом електрозварювання з оплавленням кромок.

Технологічний процес складається з п'яти основних операцій: підготовки смуги до формування; формування, зварювання, калібрування; обробки готових труб. На рис. 4.2 представлена типова схема розташування обладнання трубоелектрозварювального стану.

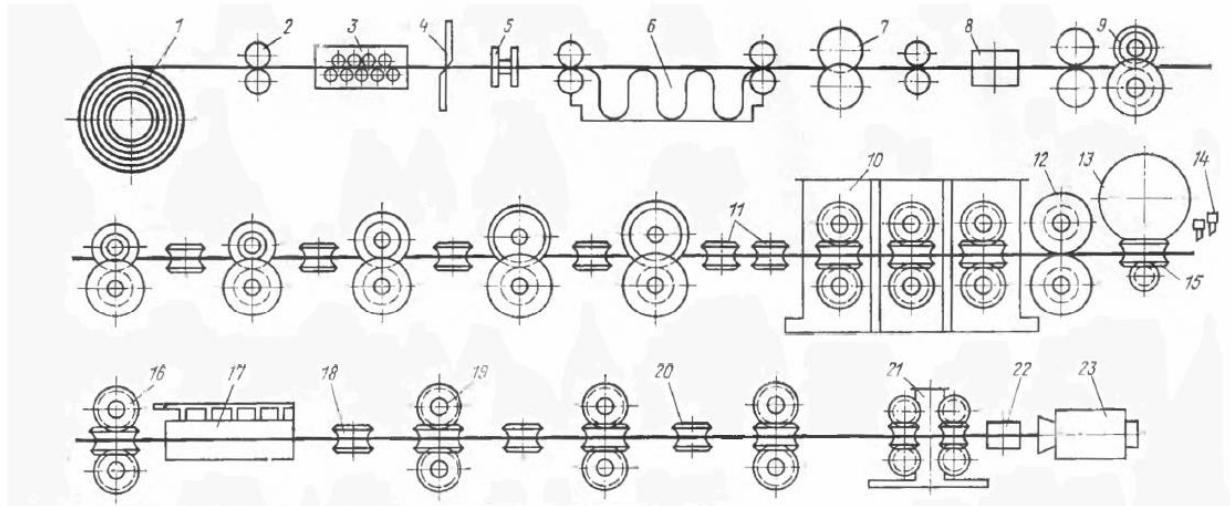


Рис. 4.2. Типова схема розташування обладнання трубоелектрозварювального стану безперервного типу.

Склад обладнання згідно з рис. 4.2: 1 – розмотувач; 2 – ролики, що тягнуть; 3 – правильна машина; 4 – ножиці для обрізки кінців рулону; 5 – стикозварювальна машина; 6 – петлеутворювач; 7 – дискові ножиці з кромкокрошителем; 8 – дробеструйна установка; 9 – горизонтальні валки формувального стану; 10 – валки з розрізної шайбою формувального стану; 11 – вертикальні валки формувального стану; 12 – напрямні валки; 13 – електрозварювальна машина; 14 – механізм видалення зовнішнього ґрату; 15 – стискаючі валки; 16 – валки прасувальні; 17 – холодильник; 18 – овалізуючі валки; 19 – валки калібрувальних клітей; 20 – вертикальні валки калібрувального стану; 21 – правильна головка; 22 – дефектоскоп; 23 – летючий відрізний верстат.

При виробництві труб електрозварюванням опором за допомогою агрегату безперервного типу заготовкою служить холоднокатана або травлена гарячекатана стрічка в рулонах. Рулони подають в розмотувач з

завантажувальним пристроєм. Далі рулон розмотують і піддають правці на пресове обладнання. Кінці смуги обрізають на ножицях, щоб піддати далі зварюванню в стик задній кінець попереднього і передній кінець наступного рулонів.

Підготовлену стрічку піддають формуванню на безперервному формувальному стані і зварюванню в стик опором в зварювальному вузлі стану. Отриману трубу далі піддають правці в калібрувальному стані і правильної кліті і розрізають на мірні довжини.

Трубоелектрозварювальна машина складається з зварювальних електродних кілець, пов'язаних з обертовим зварювальним трансформатором, і стискаючих неприводних валків. Процес варіння здійснюють змінним струмом низької напруги частотою від 50 до 150 Гц.

Остаточну обробку труб здійснюють на ділянці обробки, де труби піддають правці, торцювці кінців на торцювальних станах і випробуванню на гідравлічних пресах. За загальноприйнятою технологією зняття залишкових напружень також відбувається на етапі обробки, після формування кінцевої геометрії труби і всіх внутрішніх напружень.

Згідно вдосконаленою, виходячи з проведених в даній дисертації досліджень, технології передбачається застосування вібраційної обробки на етапі зварювання. Застосування вібрації на ділянці електрозварювальної машини дозволить знизити залишкові напруження в зварному шві трубної заготовки, знизити різнозернистість металу зварного шва і наблизити механічні властивості зварного шва та біляшовної зони до механічних властивостей основного металу, що надалі позитивно вплине на геометричну точність виробленої продукції, на термін її експлуатації та на корозійну стійкість. На рис. 4.3 зображено типове виконання електрозварювальної машини.

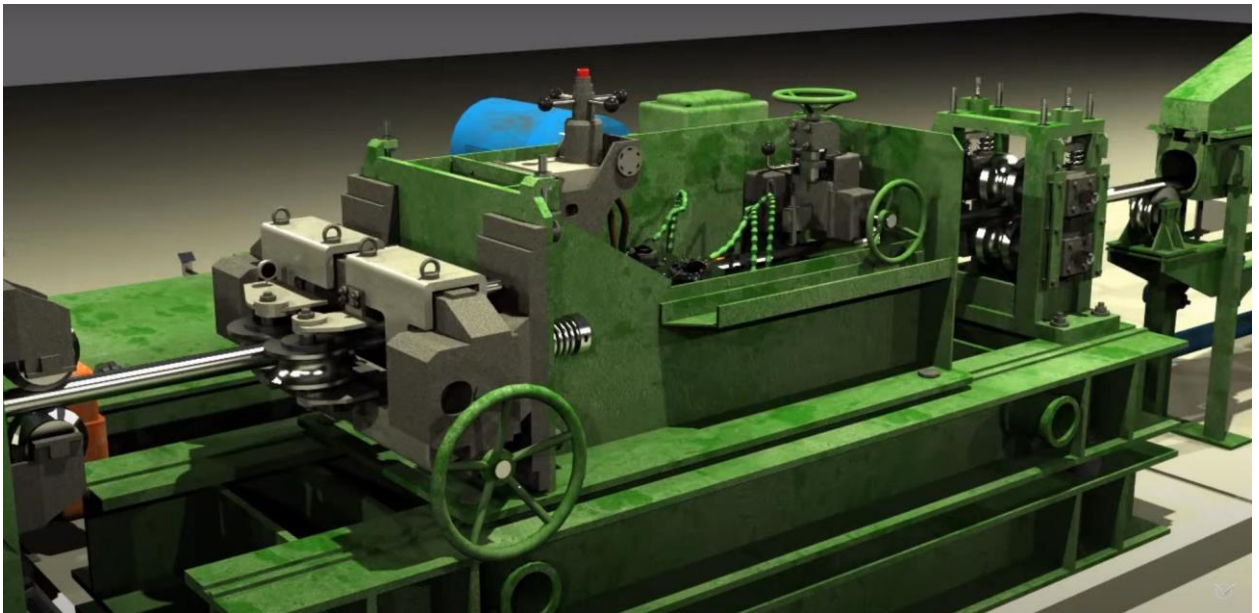


Рис. 4.3. Типове виконання електрозварювальної машини.

Досліджуючи виробництво зварних труб з точки зору застосування вібраційної обробки найбільш раціональним є вплив віброустановки не на всю електрозварювальну машину, а лише на еджерні (неприводні) ролики в ділянці зварювання. Підтримуючі валки в даному випадку виступають інструментами жорсткого закріплення, передаючими вібраційні хвилі об'єкту, що оброблюється.

Найбільш раціональне розташування джерела вібрації, виходячи з проведених у другому розділі даної дисертації розрахунків, знаходиться безпосередній під еджерними клітьми. При цьому розташуванні матеріал, що оброблюється, найбільш повно сприймає спрямовані на нього вібраційні хвилі.

Вага конструкції еджерних клітей і оброблюваної трубної заготовки має великий вплив на вибір потужності вібраційної установки. Практично встановлено, що необхідна змушуюча сила вібраційної установки повинна становити 3-4 кратну сумарну масу підданої до вібраційному впливу конструкції (вібростола) і оброблюваного матеріалу. При орієнтовній вазі еджерної кліті на ділянці зварювання із станиною в 1 тону максимальна змушуюча сила вібраційної установки для однієї кліті повинна становити 4 кН.

Також важливим параметром процесу є час вібраційного впливу на зварений шов трубної заготовки. Вібраційний вплив необхідно забезпечити протягом всього періоду охолодження зварного шва до мінімальної температури рекристалізації, враховуючи продуктивність трубоелектрозварювального агрегату.

Поставлені технологічні завдання, крім оптимального вибору і розташування вібраційної установки, досягаються за рахунок раціонального вибору параметрів і часу вібраційної обробки. Тривалість вібраційного впливу розраховується за формулою:

$$t_{\text{вибр}} = \frac{T_{\text{пл}} - T_{\text{р min}}}{2c\lambda\gamma \frac{(T_{\text{пл}} - T_0)^3}{\left(\frac{q}{v_{\text{св}}}\delta\right)^2}}$$

де $T_{\text{р min}}$ – мінімальна температура рекристалізації; $T_{\text{пл}}$ – температура плавлення; λ – коефіцієнт теплопровідності; c – питома теплоємність; γ – щільність металу; δ – товщина металу, що зварюється; $v_{\text{св}}$ – швидкість зварювання; q – кількість тепла, що вводиться у виріб джерелом; T_0 – початкова температура виробу, що зварюється.

Параметри вібрації визначаються для кожного конкретного оброблюваного об'єкта за формулою:

$$\ddot{y} + 2\delta\dot{y} + \omega_0^2 \cdot y = a \cdot \sin \omega \cdot t$$

де y – рівень залишкових напружень, δ – логарифмічний декремент згасання коливань; ω – частота вимушених коливань; ω_0 – власна циклічна частота осциляцій; t – час; a – амплітуда вимушених коливань.

Спосіб технологічного впливу вібрацією на трубку заготовку в процесі зварювання здійснюється наступним чином.

На робочій поверхні електрозварювальної машини розташовані еджерні кліті з роликами, що підтримують заготовку в процесі зварювання, яким повідомляються резонансні коливання за рахунок використання електроексцентрикових або будь-яких інших віброустановок. На рис. 4.4 показана ймовірна схема виробництва зварних труб із застосуванням вібраційної обробки.

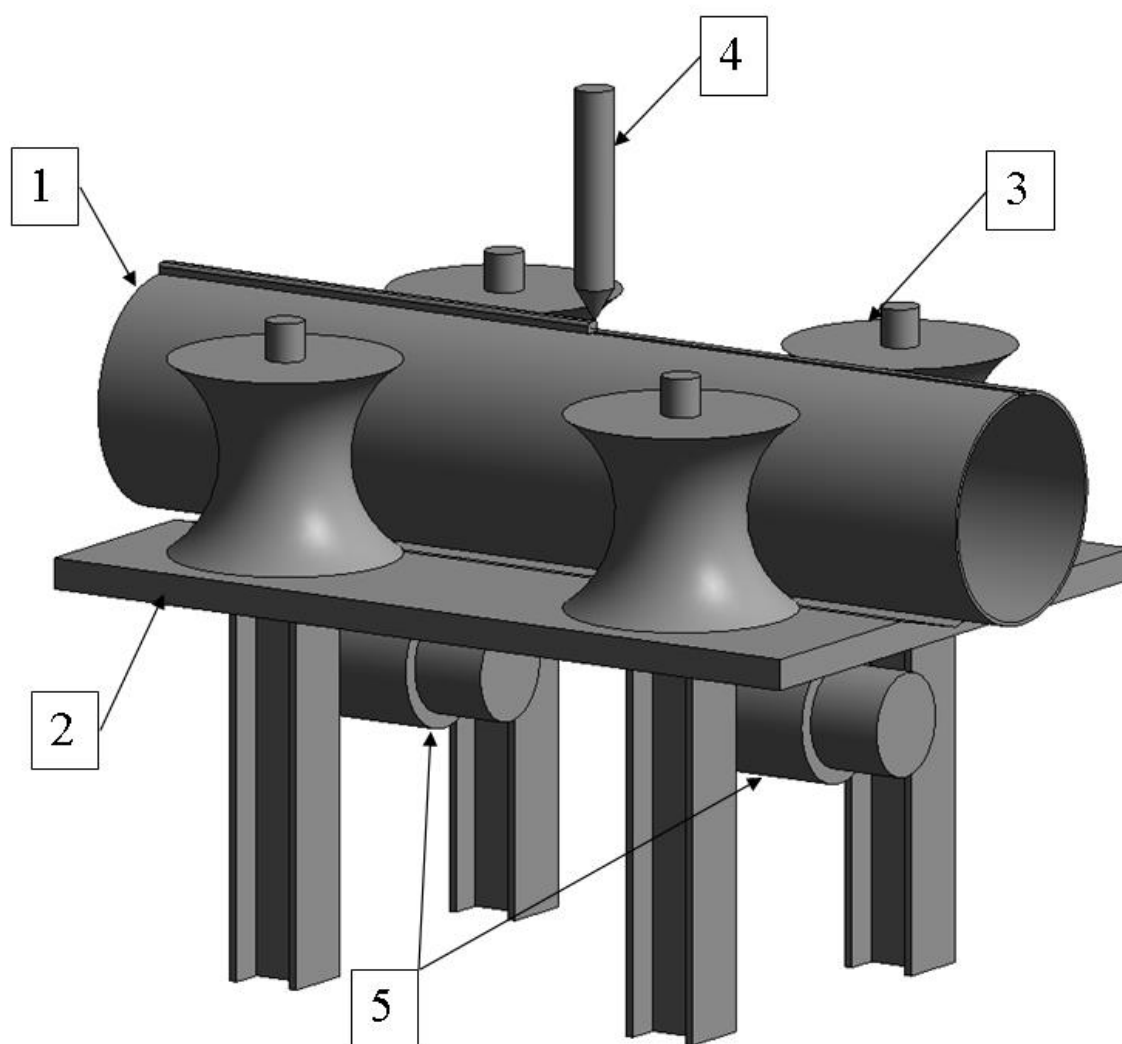


Рис. 4.4. Схема виробництва зварних труб із застосуванням вібраційної обробки: 1 – трубна заготовка; 2 – еджерні кліті електрозварювальної машини, 3 – підтискні ролики, 4 – зварювальний агрегат, 5 – вібраційна установка.

Обробляема трубна заготовка 1 закріплена на робочій поверхні еджерних клітей електрозварювальної машини 2 за допомогою підтискних роликів 3. В процесі накладання шва зварювальним агрегатом 4, еджерним клітям електрозварювальної машини повідомляються резонансні коливання за рахунок використання вібраційних установок 5.

Передбачуваний економічний ефект від впровадження даної технології є суб'єктивним фактором і безпосередньо залежить від параметрів кожного конкретного трубоелектрозварювального агрегату.

Для порівняння можна зіставити за енергетичними витратами традиційний спосіб термічної обробки з способом зняття залишкових напружень, заснованому на застосуванні вібраційного впливу в процесі зварювання трубної заготовки.

При термообробці усереднені енергетичні витрати складають 80-120 (кВт · год) на тонну готової продукції, а при вібраційному впливі в процесі зварювання енерговитрати суттєво нижчі – 6-8 (кВт · год) на тонну. Таким чином, замінивши в існуючому технологічному процесі термічний метод зняття залишкових напружень на метод вібраційного впливу в процесі зварювання трубної заготовки можна знизити енерговитрати по даному процесу в 13-15 разів.

Використовувані при розрахунку параметри властиві всім маркам сталей і сплавів, які підлягають зварюванню при виробництві труб.

Метод зняття залишкових напружень із застосуванням вібрації в процесі зварювання дозволяє на 90% замінити термічну обробку за рівнем зняття залишкових напружень. Відповідно до проведених у дисертаційній роботі досліджень, рівень зниження залишкових напружень при застосуванні методу термічної обробки складає 79%, а при застосуванні методу вібраційного впливу в процесі зварювання трубної заготовки – 71,4%.

Одночасно з цим, застосування вібраційного методу дозволяє уникнути негативних наслідків у вигляді окалини, високої тривалості та енергоємності процесу.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Зроблено оцінку достовірності експериментальних вимірювань рівня залишкових напружень, наведених в третій частині даної дисертації, за критерієм Кохрена. Згідно табличних значень критерію Кохрена, експериментально отримані значення можна вважати достовірними.

2. Виконана апроксимація результатів експериментальних досліджень на основі побудови функціональної залежності. Отримано рівняння криволінійної регресії для експериментальних значень. Якість побудованої моделі оцінюється як хороша, так як середня помилка апроксимації не перевищує 10%.

3. Виконано зіставлення результатів, отриманих методами криволінійної регресії і математичної моделі трубного зварного з'єднання, підданого вібраційному впливу. Середнє відхилення математичної моделі від експериментальних значень в ділянці резонансного піку вібраційного впливу, що знаходиться в діапазоні від 50 до 100 Гц, становить 7,23%.

4. Розроблено та запатентовано передбачуваний спосіб виробництва зварних труб із застосуванням вібраційної обробки. Технологічний процес заснований на раціональному застосуванні вібраційної обробки в процесі зварювання трубної заготовки, параметри вібрації визначаються згідно математичної моделі, розробленої в другому розділі даної дисертації.

5. Матеріали четвертого розділу опубліковані в роботі [105].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В ході виконання дисертаційної роботи отримані наступні основні результати:

1. Досліджено експериментальні дані про різні варіанти застосування вібраційної обробки в процесах виробництва зварних труб, пресування, волочіння, виробництва безперервнолитих зливків. Найбільш перспективним методом, з точки зору зняття залишкових напружень, є застосування вібрації безпосередньо в процесі зварювання трубної заготовки.

2. Розроблена формула тривалості вібраційного впливу на метал зварного шва, що дозволяє враховувати швидкість охолодження металу в зварювальній ванні.

3. Розроблено математичну модель вібраційної обробки матеріалу при зварюванні, що дозволяє визначати рівень залишкових напружень з урахуванням власної частоти вібрації, логарифмічного декременту загасання коливань, амплітуди і частоти сили, що вимушує, тривалості впливу вібрації.

4. Проведений експеримент дозволив виявити закономірності зміни рівня залишкових напружень при зварюванні трубних заготовок марки ЗПС із застосуванням вібрації різних частот. Встановлено, що при впливі вібрації частотою 50 Гц в процесі зварювання відбувається зниження залишкових напружень в зварному шві та біляшовній зоні на 71,41%.

5. Дослідження мікроструктури зварних швів заготовок марки ЗПС показало, що найменша величина зерна зафіксована в зразку, звареному із застосуванням вібрації частотою 25 Гц. Розмір зерна в даному зразку склав 41 мкм в ділянці перегріву і 6,4 мкм в ділянці нормалізації.

6. Найбільш однорідна і рівнозерниста мікроструктура виявлена в зразку трубних заготовок марки ЗПС, звареному із застосуванням вібрації частотою 50 Гц. Бал відманштеттової структури в ділянці перегріву ЗТВ зварного шва склав 2 бали. Ступінь різнозернистості в ділянці нормалізації – 0,37.

7. Проведено механічні випробування трубних заготовок марки ЗПС, зварених із застосуванням вібрації частотою 50 Гц і без вібраційної обробки.

Зразки піддавалися випробуванням на статичний розтяг і ударну в'язкість. Дослідження показали позитивний ефект застосування вібрації: показник статичного розтягування збільшився на 78%, а ударної в'язкості на 19%.

8. Виконана апроксимація результатів експериментальних досліджень на основі побудови функціональної залежності. Отримано рівняння криволінійної регресії для експериментальних значень. Якість побудованої моделі оцінюється як хороша, так як середня помилка апроксимації не перевищує 10%.

9. Виконано зіставлення результатів, отриманих методами криволінійної регресії і математичної моделі трубного зварного з'єднання, підданого вібраційному впливу. Середнє відхилення математичної моделі від експериментальних значень в ділянці резонансного піку вібраційного впливу, що знаходиться в діапазоні від 50 до 100 Гц, становить 7,23%.

10. Розроблено та запатентовано передбачуваний спосіб виробництва зварних труб із застосуванням вібраційної обробки. Технологічний процес заснований на раціональному застосуванні вібраційної обробки в процесі зварювання трубної заготовки, параметри вібрації визначаються згідно математичної моделі, розробленої в другому розділі даної дисертації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гатовский К.М., Кархин В.А. Теория сварочных деформаций и напряжений. Л.: ЛКИ, 1980. 331 с.
2. Малеткина Т.Ю. Сварочные напряжения и деформации: методические указания к лабораторным работам. Часть I и II. Томск: Том. гос. архит. - строит. ун-та, 2010. 26 с.
3. Медведев А.Ю., Бычков В.М., Тарасенко Е.Е., Измайлова Н.Ф., Дубин А.И. Исследование остаточных напряжений в соединениях, полученных линейной сваркой трением. *Вестник УГАТУ*. 2012. Т. 16. № 7(52). С. 59-62.
4. Colegrove P., Ikeagu Ch., Thistlethwaite A., Williams St., Nagy T., Suder W., Steuwer A., Pirling Th. The welding process impact on residual stress and distortion. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2009. Vol. 14(8). pp. 717-725.
5. Кузьминов С. А. Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. Л.: Судостроение, 1974. 288 с.
6. Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций. М.: Высшая школа, 1982. 272 с.
7. Гольдштейн Р.В., Козинцев В.М., Попов А.Л., Чернышев Г.Н. Экспериментально-теоретический метод диагностики отслоений тонких покрытий. *ПММ*. 2000. Т. 64. Вып. 2. С. 332-336.
8. Барановский М.Ю., Тарасов В.А. Стандартизированные ферменные конструкции с уклоном 10% пролётами 24, 30, 36 метров. *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2014. № 7. С. 93-101.
9. Зарезин А.А. Разработка методики определения остаточных сварочных напряжений на основе метода пенетрации в сочетании с электронной спекл-интерферометрией: дисс. на соискание науч. степени канд. тех. наук РФ 05.03.06 «Технологии и машины сварочного производства». Челябинск, 2003. 216 с.

10. Махненко В.И., Великоиваненко Е.А., Шекера В.М., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. Остаточные сварочные напряжения в зоне кольцевых сварных стыков трубопроводов из аустенитной стали. *Автоматическая сварка*. 1998. № 11. С. 32-39.
11. Kordisch, H., Boschen, R., Blauel, J.G., Schmitt, W., Nagel, G. Experimental and numerical investigations of the warm-prestressing (WPS) effect considering different load paths. *Nuclear Engineering and Design*. 2000. Vol. 84 (3). pp. 447-450.
12. Гатовский К. М. Теория сварочных напряжений и деформаций. Л: изд. Ленинградского Ордена Ленина кораблестроительного института. 1980. 331 с.
13. Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S. Theory of Plates and Shells. New York: McGraw-Hill. 1959. 580 p.
14. Касаткин Б.С., Кудрин А.Б., Лобанов Л.М. и др. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: справочное пособие. Киев: Наук. думка. 1981. 583 с.
15. Колесников Я.А., Ямилев М.З., Фазылов М.Р. Численное моделирование сварного соединения из стали 15х5м и оценка его напряженно-деформированного состояния. *Сборник научных трудов*. Уфа. 2008. С. 135-151.
16. Федосеева Е.М., Игнатов М.Н., Летягин И.Ю., Казымов К.П. Современные методы идентификации неметаллических включений в сварных соединениях трубных сталей. *Тяжелое машиностроение*. 2011. № 1. С. 45-47.
17. Федосеева Е.М., Олышанская Т.В., Игнатов М.Н. Моделирование нестационарных процессов в сварном соединении трубопровода. *Тяжелое машиностроение*. 2011. № 3. С. 31-37.
18. Гольдштейн Р.В., Козинцев В.М., Подлесных А.В., Попов А.Л., Челюбеев Д.А. Метод электронной спекл- интерферометрии для

- решения некоторых обратных задач механики упругих тел. *Изв. РАН. МТТ*. 2006. № 2. С. 5-14.
19. Гольдштейн Р.В., Козинцев В.М., Куров Д.А., Попов А.Л., Челюбеев Д.А. Разработка метода определения сварочных напряжений по цветам побежалости. *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2002. № 2. С. 11-23.
 20. Stoney G.G. The tension of metallic films, deposited by electrolysis. *Proc. Roy. Soc. London Ser. A*. 1999. Vol. 82. № 553. pp. 172-175.
 21. Зарубин П.Е., Барановский М.Ю., Тарасов В.А. Teklastructures – инновация в создании конструкций. *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2013. № 5. С. 1-8.
 22. Фокин В.Г. Остаточные напряжения и коробление при осаждении покрытия. *Вестн. Сам ГТУ*. Сер. Техн. науки. 2000. № 10. С. 40-45.
 23. Гольдштейн Р.В., Козинцев В.М., Подлесных А.В. и др. Многослойные тонкие покрытия и их диагностика с помощью лазерно-компьютерной интерферометрии. Препринт № 741. М. : Ин-т проблем механики РАН. 2003. 34 с.
 24. Michaleris P., Dantzig J., Tortorelli D. Minimization of welding residual stress and distortion in large structures. *Welding Journal*. 1999. Vol. 78 (11). pp. 361-366.
 25. Ватин Н.И., Синельников А.С. Большепролетные надземные пешеходные переходы из легкого холодногнутого стального профиля. *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2012. № 1. С. 47- 52.
 26. Игнатъев А. Г., Зарезин А. А. Метод измерения остаточных сварочных напряжений. «Сварка-контроль. Итоги XX века»: сб. докл. 19 н.-т. конф. Сварщиков Урала. Челябинск: ЦНТИ. Челябинск, 2000. С. 159-161.
 27. Игнатъев А. Г., Пызин Г. П. Определение остаточных напряжений при сварке труб из стали 45. *Вопросы сварочного производства: сборник научных трудов*. Челябинск: ЧГТУ. 1994. С. 31-35.

28. Шестаков, С.Д. Ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование для упрочнения и пассивации наклепом: теория, технологические процессы и оборудование. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2013. №7. С. 3-15.
29. Андреев В. Ультразвуковая ударная обработка, как метод повышения долговечности сварных соединений. *Оборудование*. 2006. № 3. С. 32-33.
30. Анучкин М.П., Горицкий В.Н., Мироненко Б.И. Трубы для магистральных трубопроводов. М. : Недра, 1986. 231 с.
31. Статников Е.Ш., Муктепавел В.О. Технология ультразвуковой ударной обработки как средство повышенной надежности и долговечности сварных металлоконструкций. *Сварочное производство*. 2003. №4. С. 25-29.
32. Антонов А. А., Стеклов О. И. и др. Исследование технологических остаточных напряжений в сварных соединениях магистральных трубопроводах. *Заготовительные производства в машиностроении*. 2012. № 3. С.13-19.
33. Безбородов В.П., Клименов В.А., Плешанов В.С. и др. Влияние ультразвуковой ударной обработки на структуру и свойства сварных соединений теплостойкости стали 12Х1МФ. *Сварочное производство*. 2000. № 7. С. 17-21.
34. Белкин А.А., Мирочник В.Л., Мякишева С.У. Опыт исследования причин разрушения трубопроводов. *Промышленная безопасность*. 2002. № 1. С. 22-25.
35. Ключев В.В., Пархоменко П.П., Абрамчук В.Е. и др. Технические средства диагностирования: справочник в 7 т. М.: Машиностроение, 2006. 672 с.
36. Коломийцев Е. В., Серенко А. Н. Влияние ультразвуковой и лазерной обработки на сопротивление усталости стыковых сварных соединений

- в воздушной и коррозионной в средах. *Автоматическая сварка*. 1990. №11. С. 13-15.
37. Москвитина Л.В. Повышение технологической прочности сварных соединений высокопрочных низколегированных сталей предварительной взрывной обработкой: автореф. дис. на соискание степени канд. техн. наук. РФ 05.03.06 «Технологии и машины сварочного производства». Якутск, 2005. 22 с.
 38. Михеев П.П., Недосека А.Я., Пархоменко И.В. и др. Эффективность применения ультразвуковой ударной обработки для повышения сопротивления усталости сварных соединений. *Автоматическая сварка*. 1984. №3. С. 4-7.
 39. Allen A.J., Hutchings M.T., Windsor C.G. Neutron diffraction methods for the study of residual stress fields. *Advances in Physics*. 1985. Vol. 34. №. 4. pp. 445-473.
 40. Пушаровский Д.Ю. Рентгенография минералов: учеб. для геол. спец. ВУЗов. М.: ЗАО "Геоинформмарк", 2000. 296 с.
 41. Серебренников В.Л., Демченко И.И., Серебренников В.Л. Определение локальных внутренних напряжений в конструкционных материалах ультразвуковым способом. *Безопасность труда в промышленности*. 2012. №12. С. 40-44.
 42. Бида Г.В., Ничипурук А.П. Коэрцитиметрия в неразрушающем контроле. *Дефектоскопия*. 2000. № 10. С. 3–27.
 43. Сагалевиц В.М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений. М.: Машиностроение, 1974. 248 с.
 44. ГОСТ 20295-85 Трубы сварные прямошовные для магистральных газонефтепроводов. Техническая инструкция № ТИ 153-ТР. ТС-40-2007.
 45. Осадчий В.Я. и др. Технология и оборудование трубного производства. Учебное пособие для вузов. М.: Интермет Инжиниринг, 2007. 560 с.

46. Savkyn. S.V. Development of metal magnetic memory method for determining residual stresses in the production of welded pipes. *SWorldJournal*. 2021. №8. С. 6-12. DOI: 10.30888/2663-5712.2021-08-01-001
47. Коликов А.П., Звонарев Д.Ю., Таупек И.М., Кадильников С.В., Галимов М.Р. Математическая модель пластического формоизменения листовой заготовки для изготовления сварных труб большого диаметра. Сообщение 1. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2016. Том 59. № 7. С. 455 – 461.
48. Коликов А.П., Звонарев Д.Ю., Таупек И.М., Кадильников С.В., Галимов М.Р. Математическая модель пластического формоизменения листовой заготовки для изготовления сварных труб большого диаметра. Сообщение 2. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2016. Том 59. № 9. С. 615 – 621.
49. Майборода В.П., Кравчук А.С., Холин Н.Н. Скоростное деформирование конструкционных материалов. М.: Машиностроение, 1986. 264 с.
50. Зуев Л.Б. О формировании автоволн пластичности при деформировании. *Металлофизика и новейшие технологии*. 1994. Т.16. Вып. 10. С. 31-36.
51. Мороз Л.С. Механика и физика деформаций и разрушения материалов. Л.: Машиностроение, 1984. 223 с.
52. Горенко В.Г., Русаков П.В. Статические и динамические способы снижения уровня остаточных напряжений и стабилизации размера оливок. в кн. *Повышение надежности и долговечности литых деталей: сборник научных трудов АН УССР Институт проблем литья*, Киев, 1987. С. 23-39.
53. Балакин В.Ф., Кузнецов Е.В., Дидык Р.П. Физические основы и практическое применение волновой теории пластической деформации. *Теория и практика металлургии*. 2006. №3. С. 39-50.

54. Скаковский В.Д. Разработка технологии вибрационной обработки сварных конструкций балочного типа: автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. К.: Издательство ИЭС им. Е. О. Патона, 1987. 16 с.
55. Рагульскис К.М. и др. Вибрационное старение. Л.: Машиностроение, 1987. 72 с.
56. Анистратов В.Д., Гини Э.Ч. Вибрационное старение корпусных чугуновых деталей станков: Обзор. М.: НИИМАШ, 1981. 36 с.
57. Иванова Г.Н., Могильнер М.Н., Полнов В.Г., Чикадали О.Д. Вибростабилизирующая обработка металлических деталей. Алма-Ата: КазНИИНТИ, 1987. 61 с.
58. Лащенко Г.И. Вибрационная обработка сварных конструкций. К.: «Экотехнология», 2001. 56 с.
59. Дрыга А.И. Вибростабилизирующая обработка сварных и литых изделий в машиностроении. Теория, исследования, технология. Краматорск: ДГМА, 2004. 168 с.
60. Межидов В.Х., Асхабов Х.И., Эльдарханов А.С. и др. Влияние вибрации на кристаллизацию органического слитка. *Киев: ИПЛ АН УССР*. 1983. С. 35-40.
61. Таранов Е. Д., Нурадинов А.С., Кондратюк С.Е. и др. Кристаллизация и структурообразование стальных слитков в условиях вибрационного воздействия. *Процессы литья*. 1998. № 3-4. С. 84-90.
62. Балакин Ю. А., Гладков М. И. Энергоемкость внешнего воздействия на затвердевающий металл с позиций термодинамики. *Изв. вузов. Чер. металлургия*. 2001. № 6. С. 44-46.
63. Гладков М. И., Балакин Ю. А., Гончаревич И. Ф. Термодинамический анализ условий зарождения и роста кристаллов при виброобработке металла. *Изв. вузов. Чер. металлургия*. 1989. № 9. С. 27-29.
64. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Технологии современной металлургии. М.: Новые технологии, 2004. 784 с.

65. Серветник В. М., Соляников Б. Г., Носов В. А. Улучшение качества стали ШХ15 путем виброобработки слитков. *Сталь*. 1987. № 4. С. 48-49.
66. Эльдарханов А.С. Применение физических методов моделирования для изучения влияния вибрации на процессы затвердевания сплавов: дис. на соискание д-ра техн. наук. спец. 05.16.02. Киев, 1996. 321 с.
67. Балакин Ю. А., Гладков М. И. Расчет параметров вибрационной обработки кристаллизующихся металлов. *Изв. вузов. Чер. металлургия*. 2003. № 9. С. 56-60.
68. Крижанівський Є.І., Пітулей Л.Д., Феденчук Д.І. Вплив вібрації на кристалічну структуру долатної сталі. *Науковий вісник Національного Технічного Університету Нафти і Газу*. № 3(12). 2005. С. 26-30.
69. Бугай Ю.М., Пітулей Л.Д., Феденчук Д.І. Математична модель седиментаційно-вібрацій-ної рівноваги арміторів композиційного зубка шарошкового долота. *Методи та прилади контролю якості*. Івано-Франківськ: Факел. 2000. № 6. С. 100-102.
70. Хоником Р. Пластическая деформация металлов. М.: Мир, 1972. 408 с.
71. Петров Г.Л., Тумарев А.С. Теория сварочных процессов (с основами физической химии). Учебник для вузов. М. : Высш. шк, 1977. 392 с.
72. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. М.: Наука, 1965. 204 с.
73. Клименко В.М., Шаповал В.Н. Вибрационная обработка металла давлением. К.: Техника, 1977. 128 с.
74. Подгорный А.Н., Марченко Г.А., Пустынников В.И. Основы и методы прикладной теории упругости. К.: Вища школа, 1981. 328 с.
75. Морозенко В.Н., Кузнецов Е.В. Резонансный вибропластический эффект. *Металлы*. 2000. №3. С.104-107.
76. Физическая мезомеханика и компьютерное моделирование материалов; под ред.. В.Е. Панина. Новосибирск: Наука, 1995. Т.1. 298 с.; Т.2. 320 с.

77. Лавров Б.П., Гольдин Л.А. Исследование синхронизации механических вибраторов в основных схемах двухмассных грохотов. *Обогащение руд*. 1977. №3. С. 27-31.
78. Блехман И.И. Синхронизация динамических систем. М.: Наука, 1971. 986 с.
79. Нашивочников В.В. Разработка и исследование метода устранения деформаций вибрацией с нагружением: автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. Москва, 1978. 16 с.
80. Криворучко А.М., Кадильников С.В. Математическая модель вибрационного стола для снятия остаточных напряжений в сварных трубах. *Математичне моделювання*. 2017. № 2. С. 55-59.
81. Криворучко А.М., Кадильников С.В. Динамическая модель вибропрессовой установки. *Сучасні проблеми металургії*. 2018. № 21. С. 24 – 28. DOI: 10.34185/1991-7848.2018.01.05
82. Кадильников С.В. Математичне моделювання процесів діагностики залишкових напружень в зварних з'єднаннях труб великих діаметрів. *Математичне моделювання*. 2018. №2(39). С. 194-200.
83. Balakin V.F., Kadylnykova T.M., Savkyn S.V. Mathematical model of a pipe welded connection under vibration. *Математичне моделювання*. 2021. №1 (44).
84. Балакін В.Ф., Савкин С.В. Математична модель вібраційної обробки металу при зварюванні трубних заготовок. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2021* – матеріали міжнар. наук.-техн. конф. Дніпро : НМетАУ, 2021.
85. Кадильникова А.В., Савкин С.В. Об особенностях применения вибрационной обработки металла при сварке. *Сучасні проблеми машинобудування. Тези доповідей конференції молодих вчених та спеціалістів, присвяченої 145-річчю з дня народження академіка НАН України Г.Ф. Проскури та 95-річчю з дня народження академіка НАН України В.Л. Рвачова*, Харків, 30 червня 2021 р. С. 31.

86. Кадильникова А.В., Савкин С.В. Теорія застосування вібраційної обробки металу при зварюванні трубної заготовки. *Всеукраїнська науково-технічна конференція «НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ»*, Дніпро, 24 червня 2021 року. С. 29-30.
87. Стасовский Ю.Н., Сокурено В.П., Степаненко А.Н., Угрюмов Ю.Д. Уровень техники и технологии в мире для производства трубной продукции: современное состояние, перспективы развития: *Сб. научн. статей*. Днепропетровск: Акцент ПП, 2014. С. 195 – 203.
88. Осадчий В.Я., Коликов А.П. Производство и качество стальных труб. М. : Изд-во МГУПИ, 2012. 370 с.
89. Шимов Г.В., Серебряков Ал.В., Серебряков Ан.В. Апробация способа, совмещающего электроконтактную термообработку и правку теплообменных труб парогенераторов: *Сб. докл. науч.- техн. конгресса «ОМД 2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии»* Ч. 2. – М.: ООО «Белый ветер», 2014. С. 9 – 17.
90. Эфрон Л.Д. Металловедение в «большой металлургии». Трубные стали. М.: Металлургия, 2012. 696 с.
91. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов. М.: Металлургия, 1972. 408 с.
92. Шинкин В.Н. Механика сплошных сред для металлургов. М.: Изд. Дом МИСиС, 2014. 628 с.
93. Матвеев Ю.М., Каширин Н.А. Распределение остаточных напряжений в заготовке для производства труб большого диаметра: *Сб. статей ВНИТИ*. Вып. 5. М.: Металлургия, 1965. С. 6 – 10.
94. Коликов А.П., Котелкин А.В., Звонков А.Д. и др. Применение метода рентгеновской дифрактометрии для исследования остаточных напряжений в деталях при холодной обработке давлением. *Черные металлы*. 2013. № 3. С. 20 – 24.
95. Ильин Л.Н. Основы учения о пластической деформации. М.: Машиностроение, 1980. 150 с.

96. Коликов А.П., Лелётко А.С., Матвеев Д.Б., Кулютин С.А., Кадильников С.В. Исследование остаточных напряжений в сварных трубах. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2016. Том 57. № 11. С. 48 – 53.
97. Balakin V.F., Kadylnykova T.M., Savkyn S.V., Kadylnykova A.V. Experimental study of the process of welding of pipe bills under vibration impact. *SWorldJournal*. 2021. №7 С. 55-63. DOI: 10.30888/2663-5712.2021-07-01-017
98. Balakin V.F., Kadylnykova T.M., Savkyn S.V., Kadylnykova A.V. Experimental study of the influence of vibration on the microstructure of the weld of a pipe billet. *Modern engineering and innovative technologies*. 2021. №16 С. 94-104. DOI: 10.30890/2567-5273.2021-16-01-001
99. Рао С.Р. Линейные статистические методы и их применения. М.: Наука, 1968. 548с.
100. Боровков А.А. Математическая статистика. М.: Наука, 1984. 472 с.
101. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1983. 416 с.
102. Бутиков Е. И. Собственные колебания линейного осциллятора [Электронный ресурс] : учебное пособие. 20 с.
103. В. М. Жуков, А. А. Костин, В. Б. Федюшин, Л. М. Черных. Физика. Колебания и волны: лабораторный практикум. СПбГУТ. СПб., 2014. 44 с.
104. Новиков Н.В., Девин Л.Н., Осадчий А.А., Сулима А.Г., Деркач Н.Н. Влияние демпфирования режущих пластин из поликристаллов КНБ на стойкость резцов. *Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування : збірник наукових праць*. 2010. № 58. С. 229–233.
105. Спосіб виробництва зварних труб з використанням вібраційної обробки: UA 148350 U : МПК C21D10/00, B23K28/00, B23K101/10 (2006.01) / Балакін В.Ф., Савкин С.В. – № u202101402, заявл. 19.03.2021; опубл. 28.07.2021, Бюл. №30, 3 с.

106. Литовченко С.В. , Доценко Е.А., Кочетова С.Ю. Приготовление образцов для металлографического исследования микроструктуры: методические материалы к выполнению лабораторных работ по металлографии. Харьков: ХНУ им. Каразина В.Н., 2011. 14 с.
107. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография: учебное пособие. Москва: Металлургия, 1976. 271 с.

ДОДАТОК А

ООО " Придніпровський атестаційний центр неруйнівного контролю та технічної діагностики "

ПРОТОКОЛ №1

Результатів контролю методом МПМ

Найменування вузла і обсяг контролю: Скан №0001 (Зразок №1 (без вібрації))

Найменування керівного документа: ДСТУ 4857:2007 Неруйнівний контроль. Зварні з'єднання устаткування й конструкцій. Метод магнітної пам'яті металу. Загальні вимоги.

Найменування приладу: ИКН-1М-4, датчик типу 2.

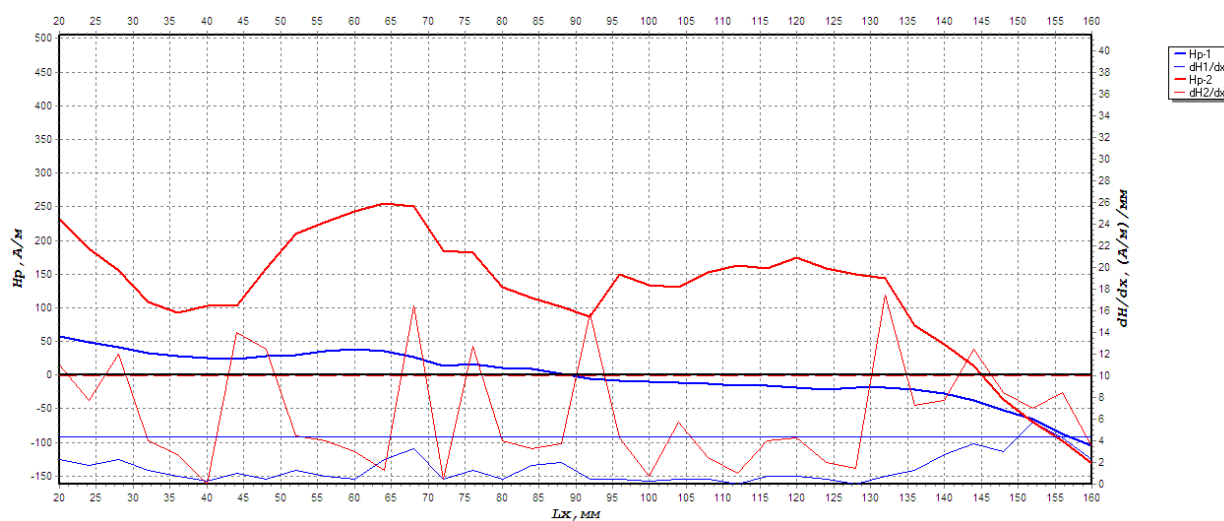


Рис.1. Розподіл напруженості магнітного поля і градієнта.

Контроль виконав

С.В. Савкин

№ ЗКН	Місце розташування ЗКН на малюнку зварного з'єднання	Екстремальні (max/min) значення поля H_p (А/м) в зоні контролю	Значення параметрів				K_d (А/м²)	Передбачуваний тип дефекту	Примітка
			$K_{ЗКН}$ (А/м²)	K_{max} (А/м²)	K_{cp} (А/м²)	m			
		255/-132		22,01	10,307	2,724			По всій зоні контролю

Дата контролю 03.12.2020

ДОДАТОК Б

ООО " Придніпровський атестаційний центр неруйнівного контролю та технічної діагностики "

ПРОТОКОЛ №2

Результатів контролю методом МПМ

Найменування вузла і обсяг контролю: Скан №0002 (Зразок №2 (з вібрацією 10 Гц))

Найменування керівного документа: ДСТУ 4857:2007 Неруйнівний контроль. Зварні з'єднання устаткування й конструкцій. Метод магнітної пам'яті металу. Загальні вимоги.

Найменування приладу: ИКН-1М-4, датчик типу 2.

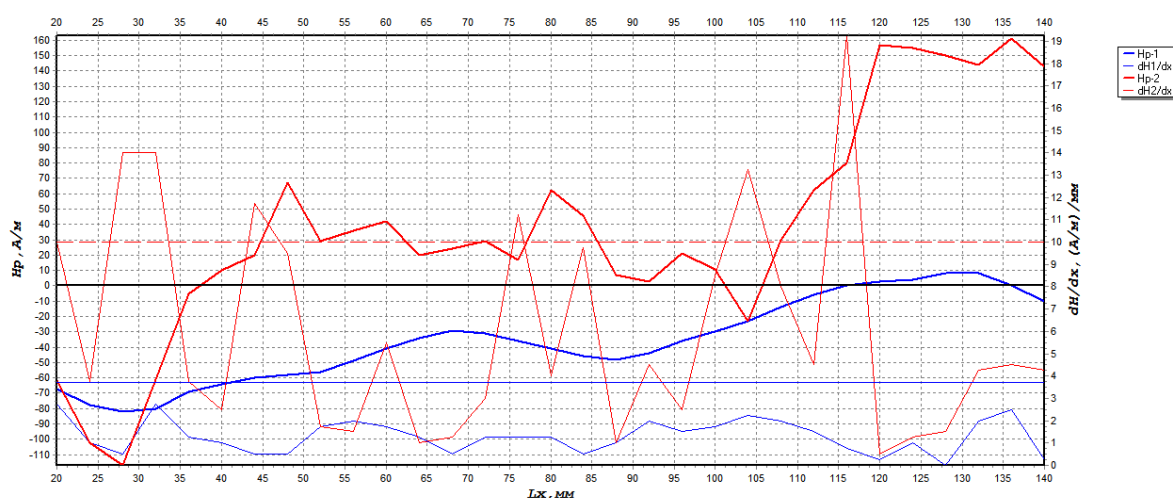


Рис.1. Розподіл напруженості магнітного поля і градієнта.

Контроль виконав

С.В. Савкин

№ ЗКН	Місце розташування ЗКН на малюнку зварного з'єднання	Екстремальні (max/min) значення поля H_p (А/м) в зоні контролю	Значення параметрів				K_d (А/м²)	Передбачуваний тип дефекту	Примітка
			К ЗКН (А/м²)	K_{max} (А/м²)	K_{cp} (А/м²)	m			
		161/-117		19,975	7,204	2,773			По всій зоні контролю

Дата контролю 03.12.2020

ДОДАТОК В

ООО " Придніпровський атестаційний центр неруйнівного контролю та технічної діагностики "

ПРОТОКОЛ №3

Результатів контролю методом МПМ

Найменування вузла і обсяг контролю: Скан №0003 (Зразок №3 (з вібрацією 25 Гц))

Найменування керівного документа: ДСТУ 4857:2007 Неруйнівний контроль. Зварні з'єднання устаткування й конструкцій. Метод магнітної пам'яті металу. Загальні вимоги.

Найменування приладу: ИКН-1М-4, датчик типу 2.

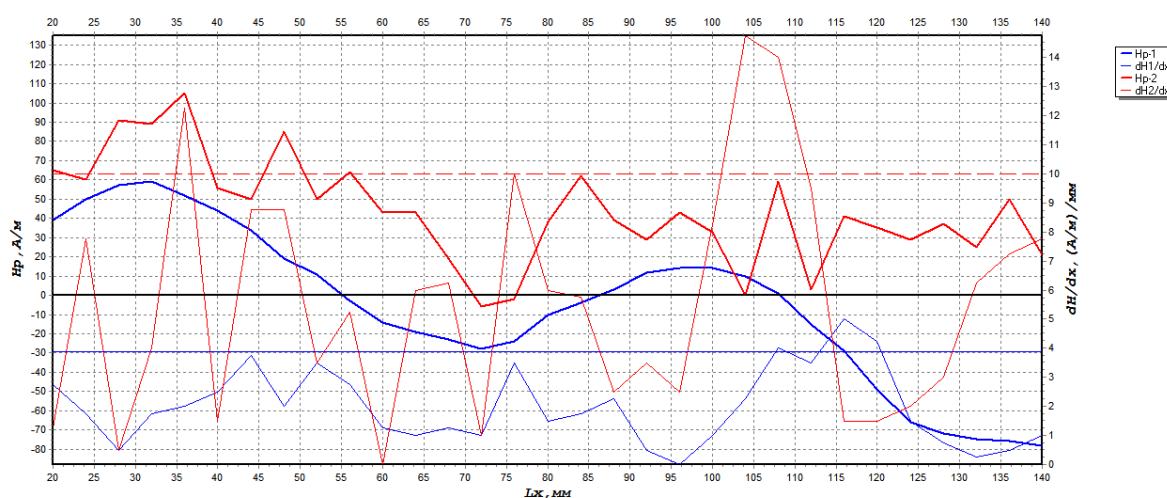


Рис.1. Розподіл напруженості магнітного поля і градієнта.

Контроль виконав

С.В. Савкин

№ ЗКН	Місце розташування ЗКН на малюнку зварного з'єднання	Екстремальні (max/min) значення поля H_p (А/м) в зоні контролю	Значення параметрів				K_d (А/м ²)	Передбачуваний тип дефекту	Примітка
			К ЗКН (А/м ²)	K_{max} (А/м ²)	K_{cp} (А/м ²)	m			
		105/-78		14,765	5,604	2,635			По всій зоні контролю

Дата контролю 03.12.2020

ДОДАТОК Г

ООО " Придніпровський атестаційний центр неруйнівного контролю та технічної діагностики "

ПРОТОКОЛ №4

Результатів контролю методом МПМ

Найменування вузла і обсяг контролю: Скан №0004 (Зразок №4 (з вібрацією 50 Гц))

Найменування керівного документа: ДСТУ 4857:2007 Неруйнівний контроль. Зварні з'єднання устаткування й конструкцій. Метод магнітної пам'яті металу. Загальні вимоги.

Найменування приладу: ИКН-1М-4, датчик типу 2.

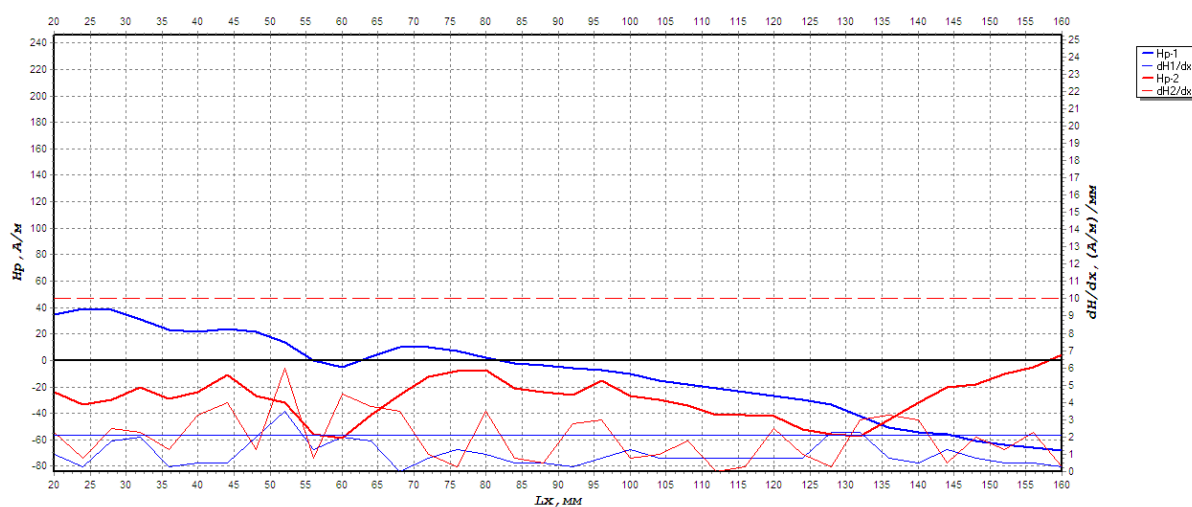


Рис.1. Розподіл напруженості магнітного поля і градієнта.

Контроль виконав

С.В. Савкин

№ ЗКН	Місце розташування ЗКН на малюнку зварного з'єднання	Екстремальні (max/min) значення поля H_p (А/м) в зоні контролю	Значення параметрів				K_d (А/м ²)	Передбачуваний тип дефекту	Примітка
			$K_{ЗКН}$ (А/м ²)	K_{max} (А/м ²)	K_{cp} (А/м ²)	m			
		39/-68		6,738	2,947	2,286			По всій зоні контролю

Дата контролю 03.12.2020

ДОДАТОК Г

ООО " Придніпровський атестаційний центр неруйнівного контролю та технічної діагностики "

ПРОТОКОЛ №5

Результатів контролю методом МПМ

Найменування вузла і обсяг контролю: Скан №0005 (Зразок №5 (з вібрацією 75 Гц))

Найменування керівного документа: ДСТУ 4857:2007 Неруйнівний контроль. Зварні з'єднання устаткування й конструкцій. Метод магнітної пам'яті металу. Загальні вимоги.

Найменування приладу: ИКН-1М-4, датчик типу 2.

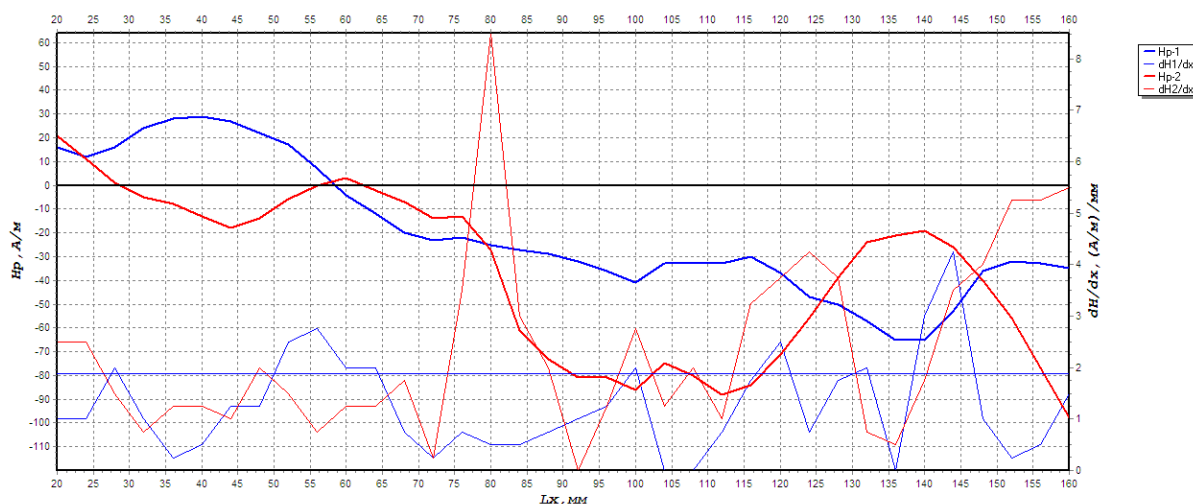


Рис.1. Розподіл напруженості магнітного поля і градієнта.

Контроль виконав

С.В. Савкин

№ ЗКН	Місце розташування ЗКН на малюнку зварного з'єднання	Екстремальні (max/min) значення поля H_p (А/м) в зоні контролю	Значення параметрів				K_d (А/м²)	Передбачуваний тип дефекту	Примітка
			$K_{ЗКН}$ (А/м²)	K_{max} (А/м²)	K_{cp} (А/м²)	m			
		29/-98		8,501	2,968	2,864			По всій зоні контролю

Дата контролю 03.12.2020

ДОДАТОК Д

ООО " Придніпровський атестаційний центр неруйнівного контролю та технічної діагностики "

ПРОТОКОЛ №6

Результатів контролю методом МПМ

Найменування вузла і обсяг контролю: Скан №0006 (Зразок №6 (з вібрацією 100 Гц))

Найменування керівного документа: ДСТУ 4857:2007 Неруйнівний контроль. Зварні з'єднання устаткування й конструкцій. Метод магнітної пам'яті металу. Загальні вимоги.

Найменування приладу: ИКН-1М-4, датчик типу 2.

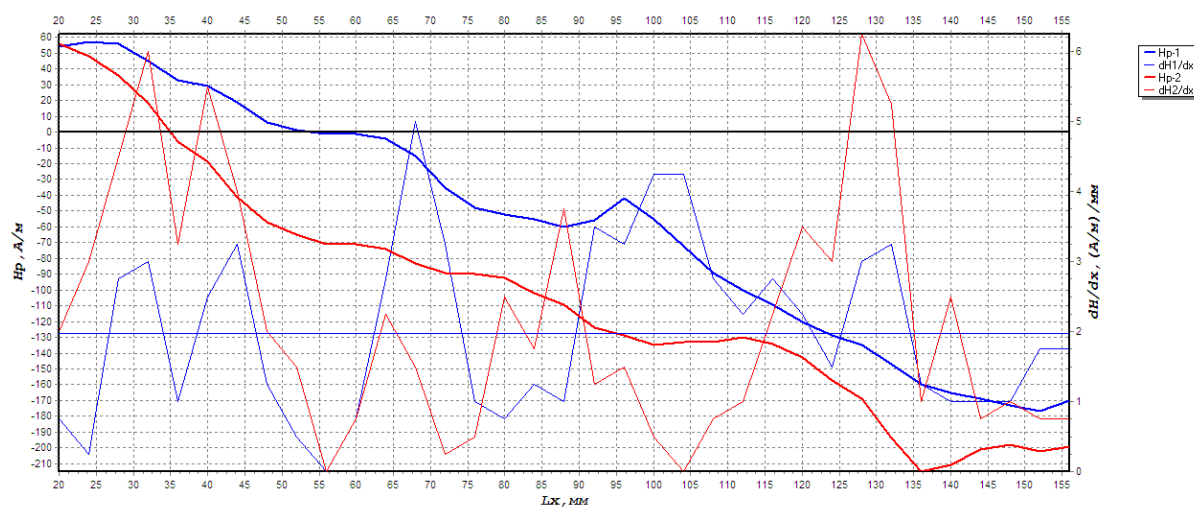


Рис.1. Розподіл напруженості магнітного поля і градієнта.

Контроль виконав

С.В. Савкин

№ ЗКН	Місце розташування ЗКН на малюнку зварного з'єднання	Екстремальні (max/min) значення поля H_p (А/м) в зоні контролю	Значення параметрів				K_d (А/м²)	Передбачуваний тип дефекту	Примітка
			$K_{ЗКН}$ (А/м²)	K_{max} (А/м²)	K_{cp} (А/м²)	m			
		57/-215		6,82	3,951	1,726			По всій зоні контролю

Дата контролю 03.12.2020

ДОДАТОК Е

ООО " Придніпровський атестаційний центр неруйнівного контролю та технічної діагностики "

ПРОТОКОЛ №7

Результатів контролю методом МПМ

Найменування вузла і обсяг контролю: Скан №0007 (Зразок №7 (з вібрацією 125 Гц))

Найменування керівного документа: ДСТУ 4857:2007 Неруйнівний контроль. Зварні з'єднання устаткування й конструкцій. Метод магнітної пам'яті металу. Загальні вимоги.

Найменування приладу: ИКН-1М-4, датчик типу 2.

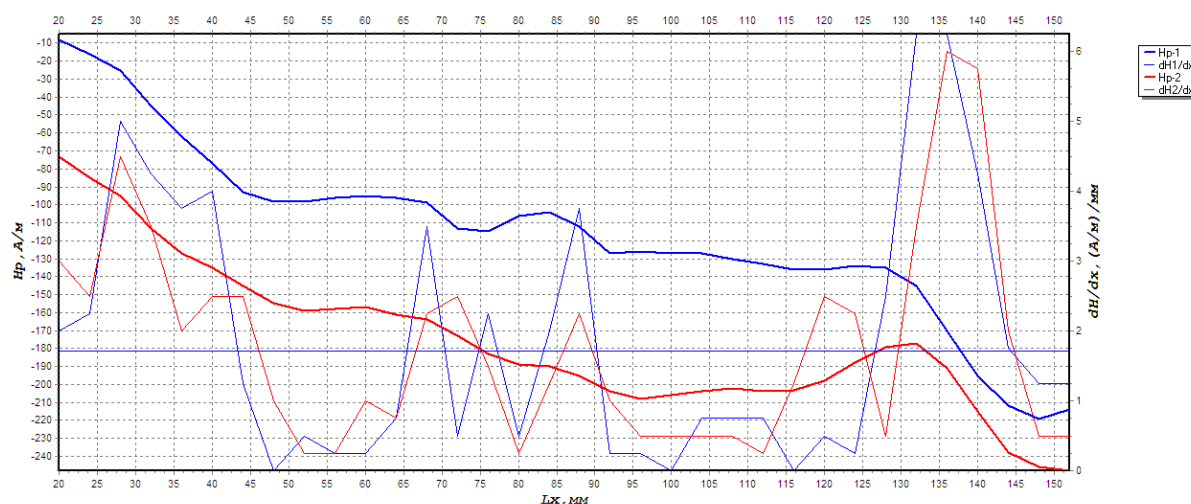


Рис.1. Розподіл напруженості магнітного поля і градієнта.

Контроль виконав

С.В. Савкин

№ ЗКН	Місце розташування ЗКН на малюнку зварного з'єднання	Екстремальні (max/min) значення поля H_p (А/м) в зоні контролю	Значення параметрів				K_d (А/м ²)	Передбачуваний тип дефекту	Примітка
			$K_{ЗКН}$ (А/м ²)	K_{max} (А/м ²)	K_{cp} (А/м ²)	m			
		-8/-248		6,839	4,74	1,443			По всій зоні контролю

Дата контролю 03.12.2020

ДОДАТОК Є

ООО " Придніпровський атестаційний центр неруйнівного контролю та технічної діагностики "

ПРОТОКОЛ №8

Результатів контролю методом МПМ

Найменування вузла і обсяг контролю: Скан №0008 (Зразок №8 (з вібрацією 150 Гц))

Найменування керівного документа: ДСТУ 4857:2007 Неруйнівний контроль. Зварні з'єднання устаткування й конструкцій. Метод магнітної пам'яті металу. Загальні вимоги.

Найменування приладу: ИКН-1М-4, датчик типу 2.

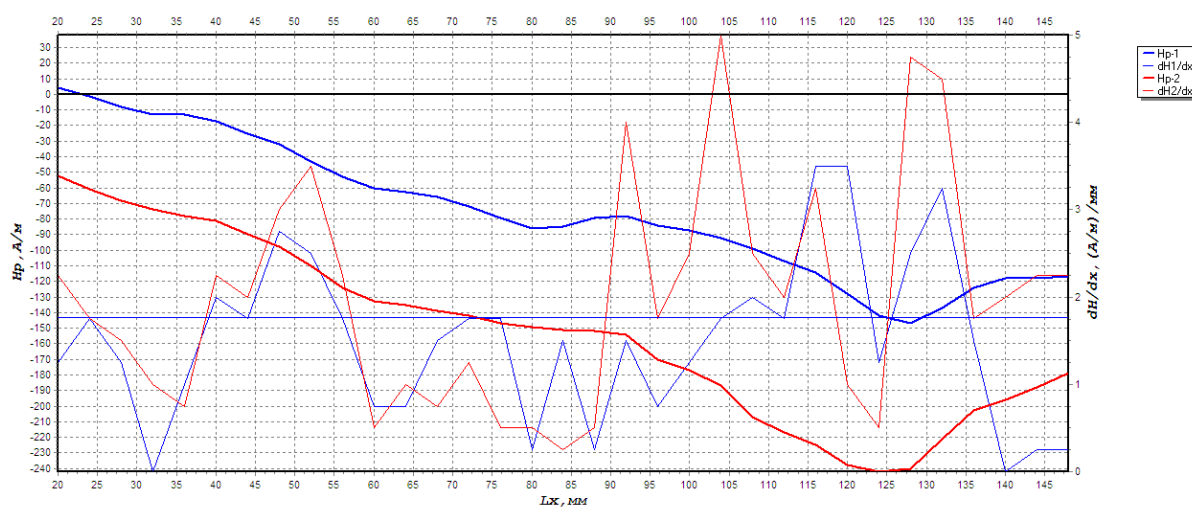


Рис.1. Розподіл напруженості магнітного поля і градієнта.

Контроль виконав

С.В. Савкин

№ ЗКН	Місце розташування ЗКН на малюнку зварного з'єднання	Екстремальні (max/min) значення поля H_p (А/м) в зоні контролю	Значення параметрів				K_d (А/м²)	Передбачуваний тип дефекту	Примітка
			$K_{ЗКН}$ (А/м²)	K_{max} (А/м²)	K_{cp} (А/м²)	m			
		4/-242		8,186	5,518	1,483			По всій зоні контролю

Дата контролю 03.12.2020

ДОДАТОК Ж

ООО " Придніпровський атестаційний центр неруйнівного контролю та технічної діагностики "

ПРОТОКОЛ №9

Результатів контролю методом МПМ

Найменування вузла і обсяг контролю: Скан №0009 (Зразок №9 (з вібрацією 175 Гц))

Найменування керівного документа: ДСТУ 4857:2007 Неруйнівний контроль. Зварні з'єднання устаткування й конструкцій. Метод магнітної пам'яті металу. Загальні вимоги.

Найменування приладу: ИКН-1М-4, датчик типу 2.

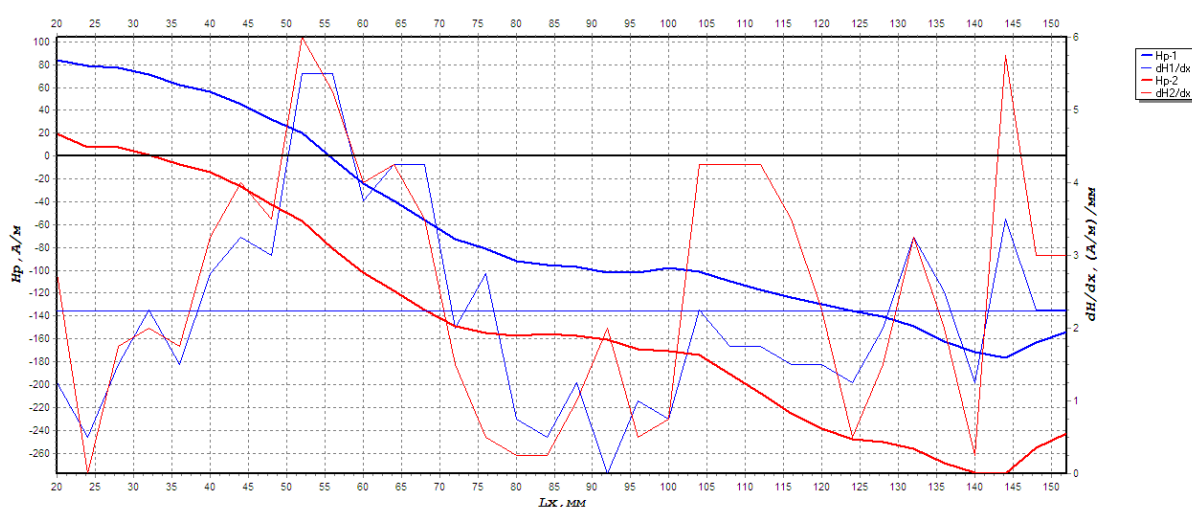


Рис.1. Розподіл напруженості магнітного поля і градієнта.

Контроль виконав

С.В. Савкин

№ ЗКН	Місце розташування ЗКН на малюнку зварного з'єднання	Екстремальні (max/min) значення поля H_p (А/м) в зоні контролю	Значення параметрів				K_d (А/м ²)	Передбачуваний тип дефекту	Примітка
			К ЗКН (А/м ²)	K_{max} (А/м ²)	K_{cp} (А/м ²)	m			
		84/-278		8,854	6,075	1,458			По всій зоні контролю

Дата контролю 03.12.2020

ДОДАТОК 3

ООО " Придніпровський атестаційний центр неруйнівного контролю та технічної діагностики "

ПРОТОКОЛ №10

Результатів контролю методом МПМ

Найменування вузла і обсяг контролю: Скан №0009 (Зразок №10 (з вібрацією 200 Гц))

Найменування керівного документа: ДСТУ 4857:2007 Неруйнівний контроль. Зварні з'єднання устаткування й конструкцій. Метод магнітної пам'яті металу. Загальні вимоги.

Найменування приладу: ИКН-1М-4, датчик типу 2.



Рис.1. Розподіл напруженості магнітного поля і градієнта.

Контроль виконав

С.В. Савкин

№ ЗКН	Місце розташування ЗКН на малюнку зварного з'єднання	Екстремальні (max/min) значення поля H_p (А/м) в зоні контролю	Значення параметрів				K_d (А/м²)	Передбачуваний тип дефекту	Примітка
			$K_{ЗКН}$ (А/м²)	K_{max} (А/м²)	K_{cp} (А/м²)	m			
		-18/-232		8,9	6,001	1,483			По всій зоні контролю

Дата контролю 03.12.2020

Відгук технічної ради
про потенційну можливість впровадження розробок
здобувача Національної металургійної академії України
Савкина С.В. на здобуття вченого ступеня доктора філософії за спеціальністю
132 – «Матеріалознавство».

Результати наукових досліджень, виконаних здобувачем Савкиним С.В. стосуються удосконалення ресурсозберігаючих технологій на основі застосування вібраційної обробки при виробництві зварних труб широкого розмірного та марочного асортименту в перспективі можуть представляти інтерес для існуючої технології виробництва труб в трубоелектрозварювальних цехах металургійних підприємств.

На базі теоретичних та експериментальних лабораторних досліджень була встановлена фізична закономірність зміни залишкових напружень при застосуванні вібрації, яка дозволяє знизити енерговитрати на процес зняття залишкових напружень приблизно в 13-15 разів, залежно від властивостей металу та параметрів процесу.

Встановлена фізична закономірність впливу вібрації на залишкові напруження при зварюванні плавленням прямошовних труб може бути реалізована після проведення реконструкції ділянки зварювальної машини трубоелектрозварювального агрегату.

Представлені наукові розробки Савкина С.В. відкривають нові можливості розвитку в реалізації проектів реконструкції трубоелектрозварювальних агрегатів металургійних підприємств, а саме:

- зниження собівартості виробництва зварних труб;
- підвищення якості продукції;
- не вимагають серйозних капітальних затрат.

Результати наукової роботи Савкина С.В. представляють практичний інтерес та при подальшому розвитку досліджень, які дозволять відповісти на питання, поставлені науково-технічною радою Інтерпайп НМТЗ, можуть бути використані при реалізації проектів реконструкції трубоелектрозварювальних агрегатів.

Начальник управління технології
та якості АТ «ІНТЕРПАЙП НМТЗ»



В.В.Москалець