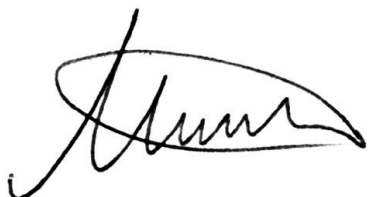


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"

**МІНАКОВ АНТОН СЕРГІЙОВИЧ**



УДК 620.179.14:539.4

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО  
СТАНУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ МЕТОДОМ**

Спеціальність 05.03.06 - зварювання та споріднені процеси і технології

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електрозварювальних установок Національного технічного університету України „Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Фомічов Сергій Костянтинович**,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського», декан зварювального факультету

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Макаренко Наталія Олексіївна**, Донбаська державна  
машинобудівна академія, завідувач кафедри  
обладнання і технологій зварювального виробництва  
ім. професора В. М. Карпенка

кандидат технічних наук, старший науковий  
співробітник

**Бондаренко Юрій Купріянович**, Інститут  
електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної  
академії наук України, провідний науковий  
співробітник лабораторії №3/87

Захист відбудеться 26 червня 2018 р. о 15-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.15 при Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, корп. 19, ауд. 435.

З дисертацією можна ознайомитись в Науково – технічній бібліотеці ім. Г.І.Денисенка Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий 26 травня 2018 року.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 26.002.15



Р.М. Рижов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В Україні працює 55 тис. промислових підприємств, де створюється 26% ВВП країни. Основний парк технологічного обладнання складають зварні конструкції (далі - ЗК) із низьковуглецевих та низьколегованих сталей. Питання економічної безпеки України залежить від продовження експлуатації існуючого обладнання. Основними факторами працездатності конструкцій є властивості матеріалу, наявність дефектів, напруження та деформації. Знання про напружено-деформований стан ЗК є важливим чинником їх успішної експлуатації. Роботи про дослідженню напруженого стану ЗК ведуться давно, однак визначення напружень в умовах наявності пластичних деформацій є мало дослідженою проблемою. Відомо, що причиною залишкових зварювальних напружень є залишкові пластичні деформації. Експериментальних методів визначення їх величин дуже бракує, що значно ускладнює оцінку технічного стану інфраструктурних об'єктів. Тому дослідження напруженого стану ЗК в умовах пластичного деформування є актуальною задачею для промисловості України.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Науково-дослідна робота за темою дисертації виконувалась на кафедрі електрозварювальних установок Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за темами: «Експериментальне дослідження напружень в зварних секціях залізнично-автомобільного мосту під час монтажу шляхом насування його через р. Дніпро», державний реєстраційний 0109U002857 «Система моніторингу напруженого стану магістральних трубопроводів магнітоанізотропним методом», Діагностика, технічне обслуговування і коригування потоку інформаційних даних вузла моніторингу механічних напружень аміакопроводу «Тольятті-Одеса» на ділянці переходу через р. Дніпро, Метрологічне обслуговування і атестація приладу типу «MESTR-411» для вимірювання механічних напружень у газопроводах, «Оцінка напруженого стану судно навантажувача 7.3», Впровадження приладів неруйнівного контролю напруженого стану магістрального аміакопроводу. Дисертантом проведено планування і виконання досліджень, а саме: вимірювання гармонічних складових, побудова та порівняння залежностей, розроблено апаратні рішення для реалізації вдосконаленого електромагнітного методу.

**Мета і завдання дослідження** – удосконалення електромагнітного методу неруйнівного контролю для оцінювання напружень та деформацій у пластично-деформованих зонах ЗК.

Для досягнення поставленої мети було поставлено такі **задачі**:

- провести аналіз вимірювальних параметрів електромагнітних методів контролю і на цій основі вибрати найбільш оптимальні;

- дослідити вплив пластичної деформації та напружень на гармонічні складові сигналу магнітоанізотропного перетворювача і на параметри петлі магнітного гістерезису та провести вибір найбільш інформативних;

- розробити методичні засади для оцінювання напружень та пластичних деформацій у пластичній зоні зварних з'єднань і ділянках із пластичними деформаціями розтягу;

- перевірити на моделі зварних з'єднань методичних засад для оцінювання напружень та пластичних деформацій у пластичній зоні зварних з'єднань;

- розробити апаратні рішення для реалізації багатопараметрового електромагнітного методу для моніторингу напружено-деформованого стану ЗК.

*Об'єкт дослідження* – зварні листові конструкції.

*Предмет дослідження* – одновісні напруження та деформації у пластичній зоні зварних з'єднань і у ділянках із пластичними деформаціями розтягу.

**Методи дослідження** ґрунтуються на методах теорії пружності та пластичності, натурних та модельних експериментах. Розроблено прикладну програму для реалізації алгоритмів розрахунків параметрів перемагнічування за величиною вихідного сигналу перетворювача.

#### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Вперше отримано параметри електромагнітного методу, за якими можливо оцінювати деформації в зоні пластичних деформацій зварних конструкцій. Такими параметрами петлі магнітного гістерезису є  $B$  (половина перетину петлі гістерезису по осі індукції) та  $H_{max}$  (половина максимальної ширини петлі гістерезису по осі напруженості магнітного поля).

2. Вперше показано, що амплітуди першої, третьої та шостої гармонік сигналу магнітоанізотропного перетворювача при дії напружень в умовах пластичних деформацій стиснення при відомих пластичних деформаціях дає можливість визначати напруження.

3. Вперше показано, що фаза першої гармоніки сигналу магнітоанізотропного перетворювача при дії напружень в умовах пластичних деформацій розтягу змінюється в обмежених діапазонах (на відміну від тільки напруженого стану). Величини самих діапазонів зміни фази залежать від значення пластичних деформацій. Це дає можливість визначати пластично-деформовані ділянки конструкції та величину пластичної деформації.

4. Вперше визначено параметр електромагнітного методу контролю, за яким можливо оцінювати напруження в зоні пластичних деформації розтягу ЗК. Таким параметром петлі магнітного гістерезису, за умови відомих пластичних деформацій, є  $B_{max}$  – половина максимальної висоти петлі магнітного гістерезису по осі індукції.

**Практичне значення одержаних результатів.** Можливість визначення зон пластичних деформацій дозволяє в стислі строки приймати рішення

щодо подовження термінів експлуатації ЗК або їх ремонту, що має істотне практичне значення. Розроблено апаратні рішення для реалізації багатопараметрового електромагнітного методу, які передбачають наявність чотирьох-полюсного магнітоанізотропного перетворювача, перетворювача параметрів перемагнічування, модуля вимірювання та обробки сигналів, засобів комп'ютерної техніки та акумуляторного блока живлення. Дані апаратні рішення мають широку можливість впровадження на підприємствах України.

**Особистий внесок здобувача.** Автором проведено науково-дослідну роботу, спрямовану на розширення параметрів електромагнітного методу оцінювання напружень та пластичних деформацій. Самостійно поставлені задачі та визначені шляхи їх вирішення, проведені експериментальні дослідження, узагальнені результати та зроблені висновки. Порівняно залежності гармонічних складових сигналу магнітоанізотропного перетворювача та перетворювача параметрів перемагнічування від напружень і пластичних деформацій. Запропоновано методичні засади використання отриманих залежностей для визначення пластичних деформацій стиснення і розтягу та наявних при цьому напружень розтягу. Розроблено апаратні рішення приладу.

При проведенні досліджень, результати яких викладені у співавторстві, автору належить: в роботі [1] – розробка апаратних рішень; [2] – розроблено алгоритм визначення напружень вигину, проведено випробування на натурних об'єктах; [3, 4, 5] – розроблено алгоритм розрахунку поздовжніх напружень, проведено випробування на натурних об'єктах; [6] – розроблено принципи передачі та обробки даних моніторингу; [7] – запропоновано використання параметрів петлі магнітного гістерезису для визначення напружень, а саме: нормування напівперерізу петлі по осі поля шляхом розділення на величину найбільшого поля; [8] – запропоновано визначати структурну складову методом коерцитивної сил, а складову напружень – магнітоанізотропним методом; [9] – запропоновано додатково у перетворювач перемагнічування ввести магнітоанізотропний перетворювач; [10] – запропоновано проводити вимірювання магнітної анізотропії до, на і після проходу прогової споруди через перекаточний пристрій.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати роботи доповідались та обговорювались на міжнародних науково-технічних конференціях «Досконалість зварювання – комплексний підхід» (Київ, НТУУ «КПІ», 2012, 2014, 2016 pp.); «Зварювання та споріднені процеси і технології» (Київ, НТУУ «КПІ», 2009, 2010, 2012, 2013, 2014, 2015 pp.); «Зварювання та суміжні технології» (Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона, НАНУ. 2009р.); IX міжнародній науково-технічній конференції «Енергетика. Екологія. Людина», (Київ, 2016 p.); наукових семінарах кафедри електрозварювальних установок НТУУ «КПІ» 2004-2010 pp., XXI Seminarum “Nieniszczace badania materialov”, Zakopane, 18-20 marca, 2015, Anais do POSMEC 2016 Simposio do Programa de Pos - Graduacao em Engenharia Mecanica, 2016.

**Публікації.** За результатами проведених досліджень опубліковано 25 наукових праць, в тому числі: 5 статей у провідних наукових фахових виданнях України та 2 - у закордонних виданнях; отримано 3 патенти України на корисну модель; опубліковано 15 тез доповідей в збірниках науково-технічних конференцій.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку посилань, додатків. Загальний обсяг роботи - 195 сторінок. Дисертація містить 140 рисунків, 12 таблиць, перелік посилань з 131 найменувань, 3 додатки на 3 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, визначено мету і завдання дослідження, розкрито наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів.

У першому розділі дисертації проаналізовано особливості формування зони пластичних деформацій під час зварювання ЗК, методи зменшення залишкових зварювальних напружень, вплив залишкових напружень на оцінку роботоспроможності зварних з'єднань ЗК. Проаналізовано відомі електромагнітні методи визначення напружено-деформованого стану ЗК: магнітошумовий метод, метод коерцитивної сили, вимірювання втрат на перемагнічування, електрорезистивний метод, метод магнітної пам'яті металу, магнітоанізотропний метод, комплексні електромагнітні методи.

Магнітошумовий метод є структурно чутливим, що значно затрудняє використання його для завдань роботи. Метод вимірювання втрат на перемагнічування показує монотонну залежність втрат перемагнічування від напружень стиснення-розтягування, однак виявлено залежність процесів перерекристалізації на сигнал перетворювача більше ніж вплив напружень. Електрорезистивний метод показує практично лінійні залежності від напружень розтягу-стиснення, однак метод потребує зняття покриття, підготовки поверхні та надійного електричного контакту, що значно ускладнює його практичне застосування на реальних ЗК. Метод магнітної пам'яті металу ґрунтується на визначенні часткової залишкової індукції металу. Однак при виготовленні ЗК в промислових умовах, де магнітні поля можуть змінюватися від трьох до шести порядків в більшу сторону від власного магнітного поля Землі, розподіл намагніченості металу є випадковим і не може бути достовірною характеристикою для визначення механічних напружень.

Останні 10-15 років почали бурхливо застосовувати метод коерцитивної сили для завдань вимірювання напружень та деформацій. Раніше метод успішно застосовувався для визначення структурних змін металу. В літературі є багато суперечливих один одному даних, що пояснюється різними умовами проведення досліджень та різними зразками за конструкцією та властивостями. Відомо, що пластичні деформації завжди є локалізованими. До того, створення умов для рівномірного пластичного

деформування вимагає додаткових зусиль. Однак у всіх роботах, виконаних в даному напрямку, констатується, що величина коерцитивної сили істотно залежить від пластичних деформацій та напружень. Є багато опублікованих даних про зміну форми граничної петлі магнітного гістерезису, що також свідчить на користь даного методу. Однак велика структурна чутливість методу потребує високої кваліфікації експертів для визначення залишкових зварювальних напружень та деформацій. Крім того, метод коерцитивної сили потребує багато часу для вимірювання. Метод ґрунтується на використанні постійних магнітних полів. Цикл намагнічування - розмагнічування потребує до 7 секунд на одне вимірювання. Ця обставина унеможлиблює сканування ЗК з метою пошуку найбільш небезпечних ділянок.

Магнітоанізотропний метод (далі – МА) активно застосовується при визначенні напруженого стану ЗК, однак із початком пластичного деформування чутливість методу знижується і з'являється неоднозначності. Слід зазначити, що даний метод не є структурно-чутливим.

Останнім часом з'явилося багато комплексних методів, коли одночасно застосовують декілька електромагнітних способів визначення. Таке поєднання є досить вдалим, при цьому переваги різних методів компенсують їх недоліки.

На основі аналізу літератури запропоновано використати для вирішення завдань роботи два методи: МА та коерцитивної сили. Останній запропоновано модернізувати для роботи в змінних полях, що дозволить сканувати ЗК. Дослідження проведені на зразках із відомими пластичними деформаціями та напруженнями.

**У другому розділі** дисертації запропоновано проводити експериментальні дослідження на зразках сталі 09Г2С із створенням в робочій зоні одновісних пластичних деформацій з подальшим додаванням одновісних напружень та визначенням параметрів методів МА і параметрів перемагнічування (далі – ПП).

Експериментальна установка по методу МА складатиметься з: низькочастотного генератора (307 Гц), чотирьохполюсного магнітоанізотропного перетворювача, аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) і комп'ютера (рис.1).

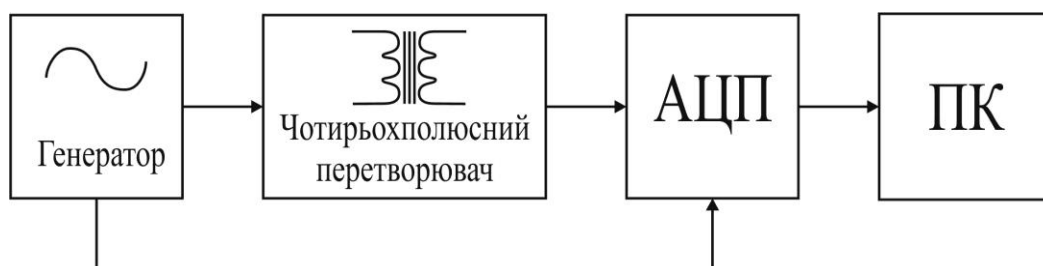


Рис. 1 Функціональна схема установки по методу МА

Сигнал з генератора одночасно подавався на перетворювач і АЦП. В комп'ютері за допомогою програмного забезпечення «PowerGraph» ТОВ

«ДИСофт» проводили гармонічний аналіз (із першої до сьомої гармонік) та визначалася фаза першої гармоніки.

Експериментальна установка по методу ПП складалася із низькочастотного генератора (40-50 Гц), підсилювача, шунта, перетворювача, аналогово-цифрового перетворювача, АЦП і комп'ютера (рис.2).

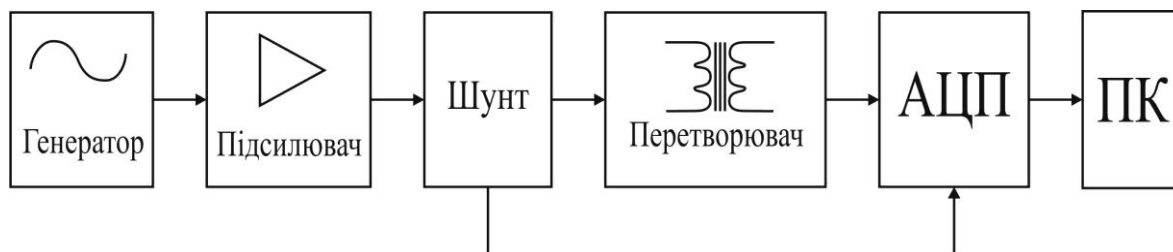


Рис. 2 Функціональна схема установки по методу ПП

Сигнал після генератора підсилюється та подається на шунт для перетворення напруги у струм. В подальшому сигнал подається на первинну обмотку перетворювача, а сигнал з вторинної обмотки - на АЦП. Аналіз сигналів оброблюється на комп'ютері, де за допомогою спеціально розробленого програмного забезпечення проводили визначення параметрів петлі магнітного гістерезису (рис.3а.). Враховуючи те, що робота перетворювача на граничних полях унеможлиблює його переміщення, конструкцією було запропоновано перейти на змінні поля. Експериментально була вибрана напруженість поля 300 А/м. Перетворювач виконано у вигляді П-подібного електромагніту (рис.3б) з котушками намагнічування (2000 витків) та вимірювання (800 витків). Габаритні розміри контактної площадки перетворювача становили 17 мм x 30 мм. Для вимірювань на зварному шві було виготовлено вузький перетворювач із шириною 5 мм. Вимірювали  $H_{max}$  (половину максимальної ширини петлі гістерезису по осі напруженості магнітного поля),  $B_{max}$  (половину максимальної висоти петлі магнітного гістерезису по осі індукції),  $H$  (половину перетину петлі гістерезису по осі напруженості поля),  $B$  (половину перетину петлі гістерезису по осі індукції) і площу петлі гістерезису  $S$ .

Було проведено окремо дослідження при пластичному деформуванні стисненням та розтягом.

Зразок-балка (далі – ЗБ) 2 (рис. 4) вкладався в середину корпусу 1 спеціально виготовленого пристосування (рис. 4) для деформування стисненням. ЗБ, які за конструкцією є плоскою балкою із сталі 09Г2С товщиною 4 мм, мали розміри 450x60 мм. Робоча зона розташовувалась по середині ЗБ. Для зменшення втрати стійкості ЗБ використовувались спрямовувачі накладки 3 (по дві з кожної сторони). Після нагрівання газовим пальником з пропано-кисневим полум'ям до температур 650-750 °С за допомогою гвинта 5 проводили деформування.



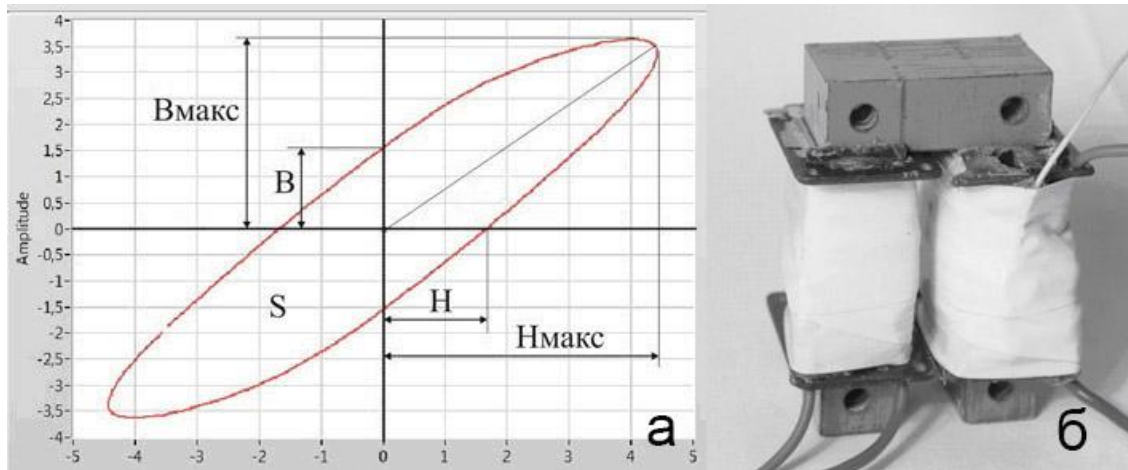


Рис.3 Параметри петлі магнітного гістерезису (а) та перетворювач по методу ПП (б)

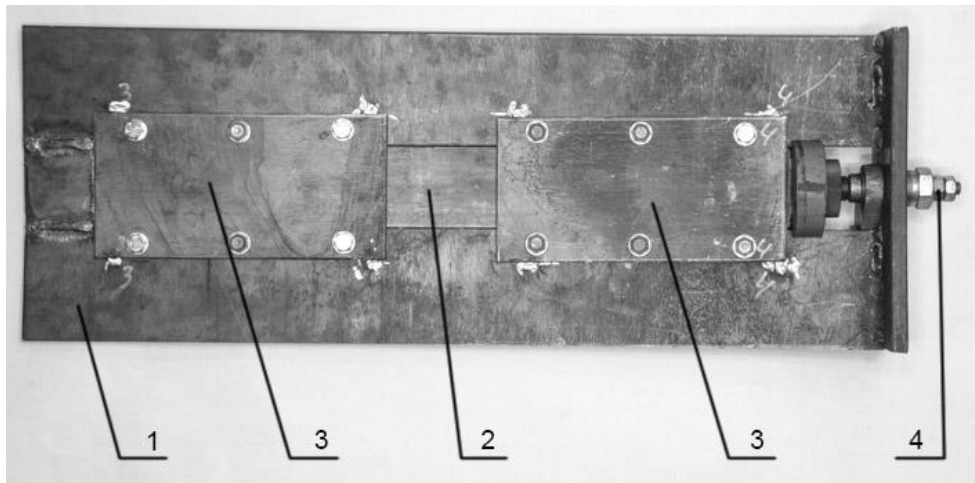


Рис. 4 Пристосування для пластичного деформування плоского зразка-балки стисненням в зібраному стані. 1 – корпус пристосування, 2 – зразок-балка, 3 – направляючі накладки (4 шт.), 5 – гвинт для деформування

Контроль ступеню пластичного деформування проводили за допомогою механічного деформометра із застосуванням головки годинникового типу (рис. 5). База вимірювань деформацій складала 50 мм.

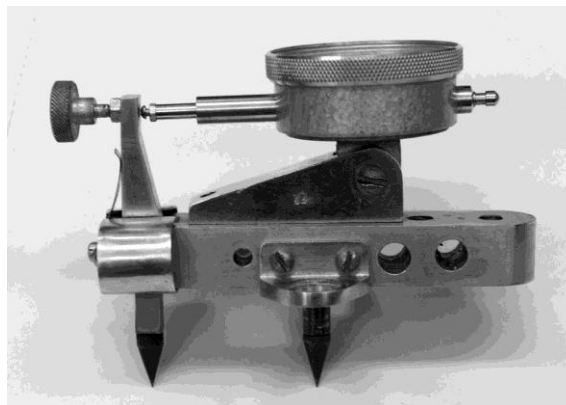


Рис. 5 Вигляд деформометра із застосуванням головки годинникового типу

Для деформування розтягом розроблено машину на базі ручного домкрату з максимальним зусиллям 250 кН (рис.6). Машина складається із нерухомої 1 та рухомої 2 частин. Між ними закріплено зразок 3 для деформування. Його закріплено у захватах 4 та 5 відповідно нерухомої 1 і рухомої 2 частин. Ручний домкрат 6 встановлено на верхній поверхні нерухомої 1 частини. Зразки для пластичного деформування розтягом мали робочу частину з розмірами 60х60 мм. Неробочу частину зразка виготовили із площею у 3 рази більшою ніж робоча (рис.7а). Після деформування із їх об'ємів вирізався зразок-балка (рис. 7б) розмірами 450х60мм.

Для наведення одновісних напружень розтягу використовували установку для навантаження плоских зразків за допомогою чистого вигину. Схема та епюри згинаючих моментів  $M$  та поперечної сили  $Q$  наведено на рис.8а, загальний вигляд установки - на рис. 8б.

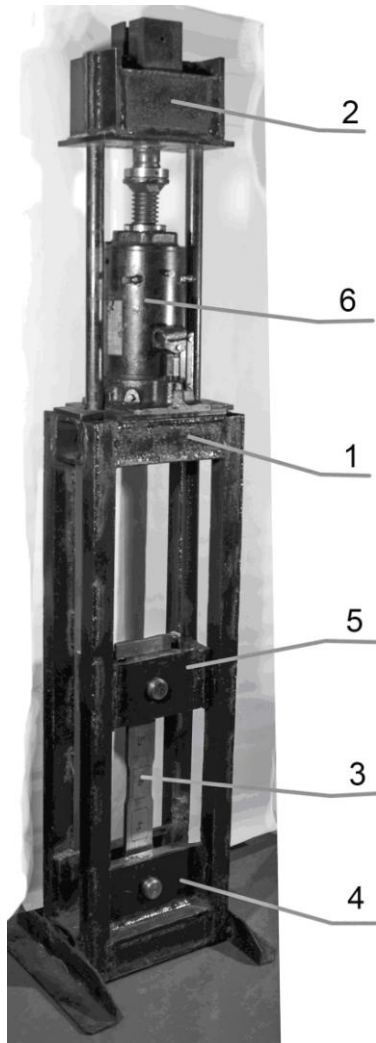


Рис.6 Машина для пластичного деформування

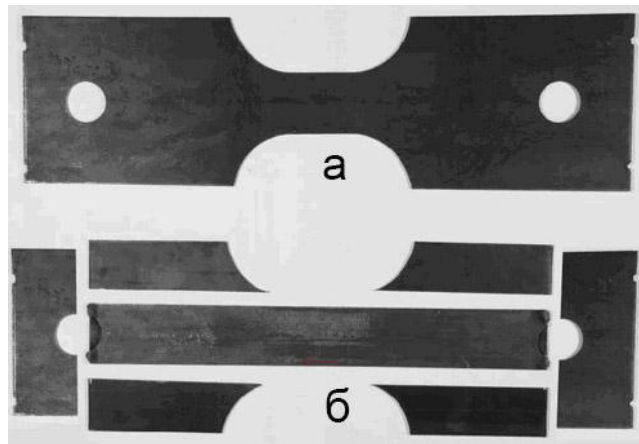


Рис. 7 Зразки для пластичного деформування розтягом: а – для деформування, б – для наведення напружень

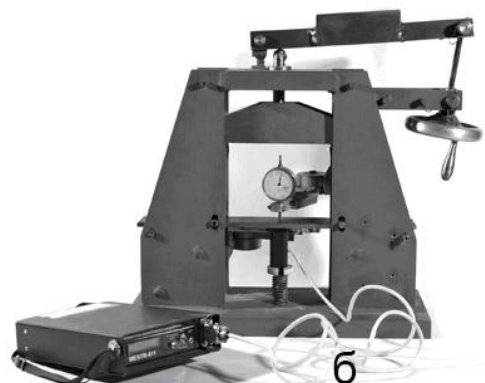
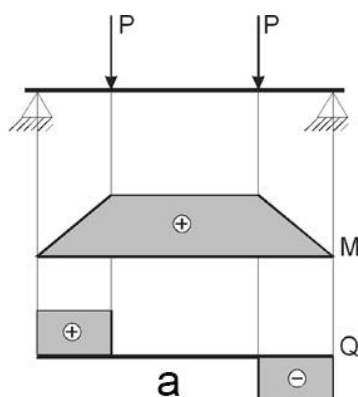


Рис. 8 Установка для навантаження чистим вигином: а – епюри згинаючих моментів та  $M$  та поперечної сили  $Q$ , б - загальний вигляд установки

ЗБ складався із двох однакових пластин сталі 09Г2С розмірами 450х60х4 мм, що були заварені по торцях сторони 60мм. Один ЗБ був у стані пластичного деформування, другий - в стані поставки. ЗБ після пластичного

деформування встановлювався в установці чистого вигину (рис. 8б) для наведення напружень розтягу. Жорсткість такого складеного ЗБ відрізняється від суцільного ЗБ розмірами 450x60x8 мм. Рішення по прогину складеного ЗБ не є очевидним, тому прийнято рішення про експериментальне визначення прогину та наведених напружень на поверхні ЗБ.

Перевірку отриманих залежностей для пластичної зони зварних з'єднань (далі – ЗЗ) проводили на моделі – пластині із прорізами (рис. 9а). На відміну від реального ЗЗ пластина із прорізами характеризується постійними властивостями, напруженнями та деформаціями. Пластини із прорізами були виготовлені із листової сталі 09Г2С товщиною 4 мм. Довжина зразків становила 200 мм, ширина прорізів 40 мм, довжина прорізів 110 мм, ширина пластини варіювалась від 93 мм до 287 мм. Середню частину пластини нагрівали газовим пальником із пропано-кисневим полум'ям. Контроль температури нагріву здійснювали за допомогою цифрового пірометра. Для запобігання нагріванню інших частин (крім центральної) розроблено та виготовлено спеціальний водяний холодильник із алюмінієвого сплаву АМГ6 (рис. 9б). Його центральне вікно відкриває зону із прорізами та закриває всі інші. Кожний бік пластини охолоджувався холодильником.

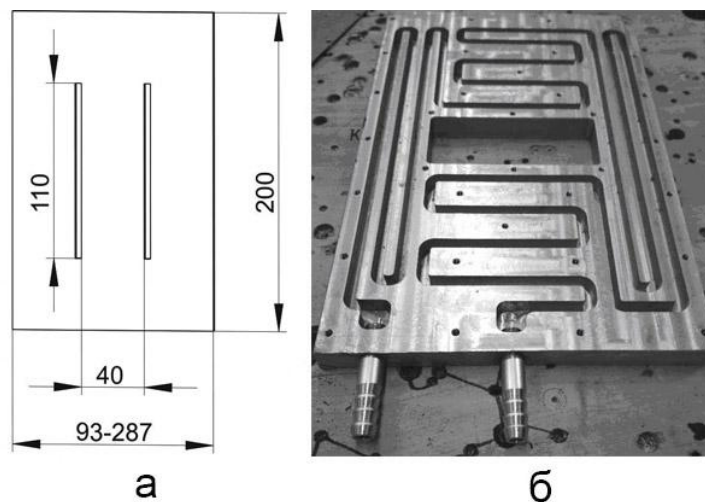


Рис. 9 а- пластина із прорізами, б- холодильник (вигляд водяних каналів охолодження)

У третьому розділі дисертації наведено результати експериментальних досліджень залежностей параметрів електромагнітних методів від пластичних деформацій та напружень.

Так параметри  $H_{max}$  та  $B$  (рис. 10) дають можливість визначати ступінь пластичного деформування стиснення ЗЗ. Залежності мають лінійний характер, що свідчить про їх незначну залежність від напружень, однак істотно залежать від пластичних деформацій. Величина параметра  $H_{max}$  зростає із збільшенням ступеню пластичної деформації. При цьому величина параметра  $B$  спадає. Це дає можливість визначати за параметрами  $H_{max}$  та  $B$  величину пластичної деформації стиснення.

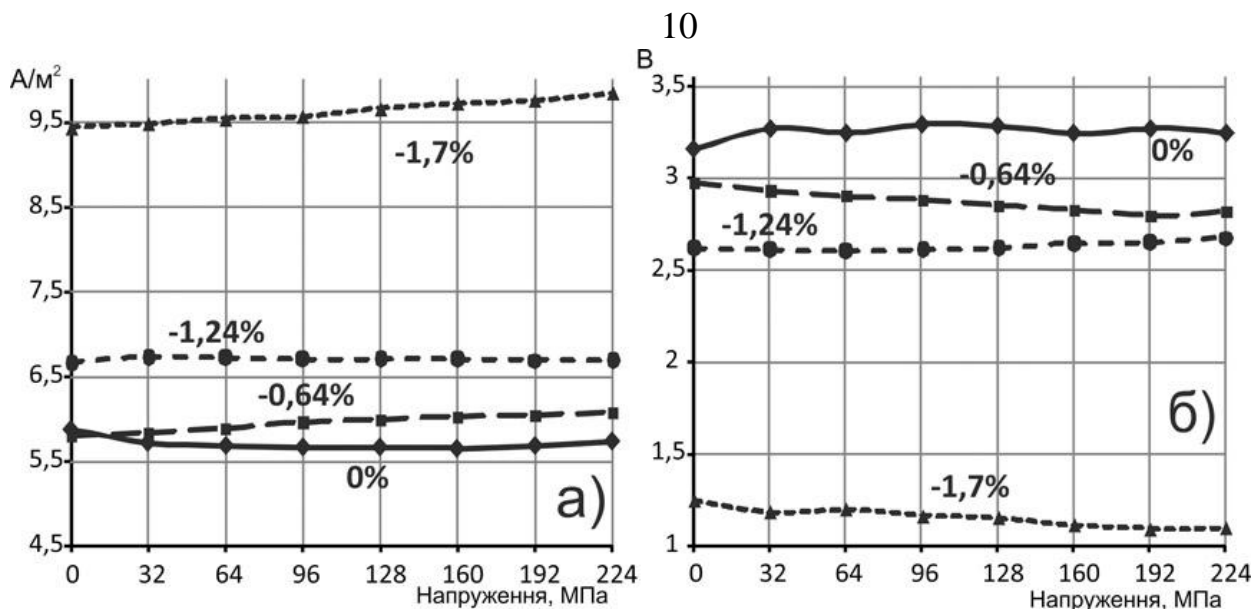


Рис. 10 Залежність параметру  $H_{max}$  (а) та  $B$  (б) перетворювача параметрів перемагнічування від напружень та пластичних деформацій стиснення

Напруження розтягу можна визначати знаючи ступінь пластичного деформування стиснення за параметрами МА методу, а саме: амплітудах  $A_1$  першої,  $A_3$  третьої та  $A_6$  шостої гармонік (рис.11)

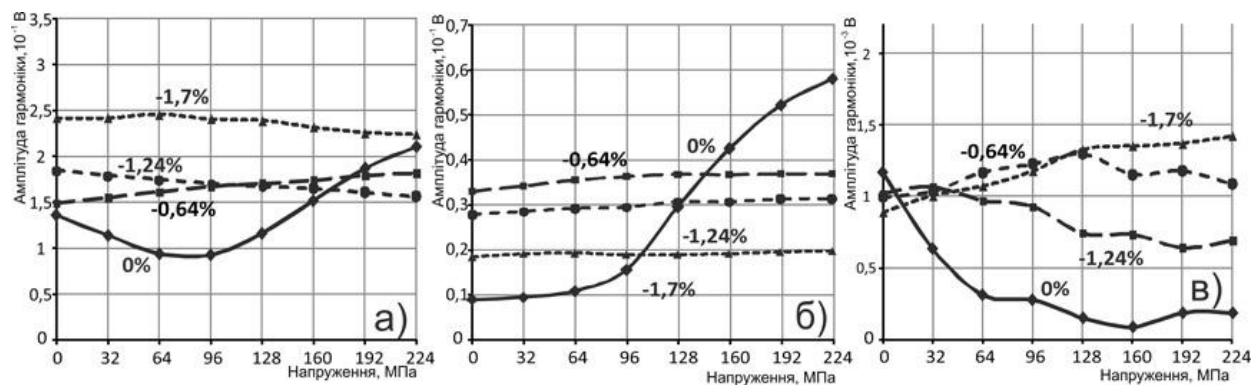


Рис. 11 Залежність першої  $A_1$  (а), третьої  $A_3$  (б) та шостої  $A_6$  (в) гармонік сигналу магнітоанізотропного перетворювача від напружень та пластичних деформацій стиснення

За фазою першої гармоніки  $A_1$  методу МА можна визначати ступінь пластичного деформування розтягу. Фаза першої гармоніки  $A_1$  при відсутності пластичного деформування має спадаючий характер (рис. 12). При величенні пластичної деформації 0,64% вона має сталий характер, а при появі 2% та 5% - зростаючий характер. Ці залежності можна використовувати для визначення ступеню пластичного деформування розтягу через те, що зміна фази відбувається тільки в певних межах. Визначення ж напружень розтягу при пластичному деформуванні розтягу можливо за параметром  $B_{max}$ , який має монотонно-зростаючий характер залежно від напружень і спадаючий характер - від пластичних деформацій.



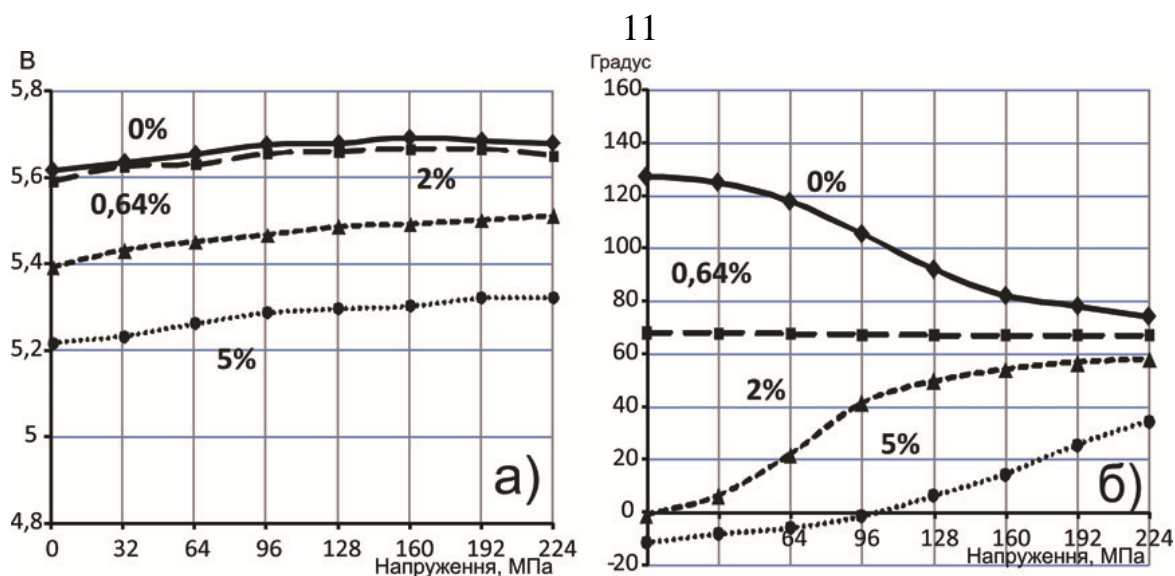


Рис. 12 Залежність параметру  $B_{\max}$  методу ПП (а) і фази першої гармоніки методу МА (б) від напружень та пластичних деформацій розтягу

Інші параметри методів МА та ПП є не досить інформативними, але їх можна використовувати при створенні системи штучного інтелекту з метою визначення деформацій та напружень.

Для перевірки отриманих залежностей застосовано моделі 33 - пластини із прорізами. Їх нагрівання проводили з однієї сторони до температури  $750-850^{\circ}\text{C}$  із витримкою 2 хвилини для більш рівномірного розподілу теплоти між сторонами пластини. Для зменшення термічного впливу ставили на холодильник термічний екран із нержавіючої сталі 08X12Н10Т товщиною 1 мм (рис. 13).

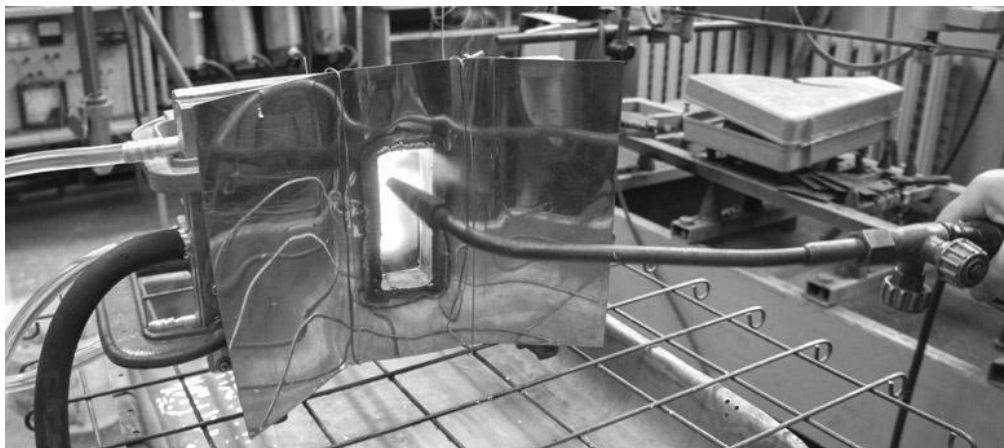


Рис. 13 Компоновка обладнання для нагрівання пластини із прорізами

Контроль деформацій здійснювався механічним деформометром по заздалегідь просвердленим базовим отворах. В результаті експерименту отримали пластичні деформації, які змінюються від  $-0,59$  до  $-0,62\%$ , та напруження в діапазоні від 220 до 331 МПа. Отримані дані на пластині із прорізами накладали на раніше отримані дані на ЗБ (рис. 14).

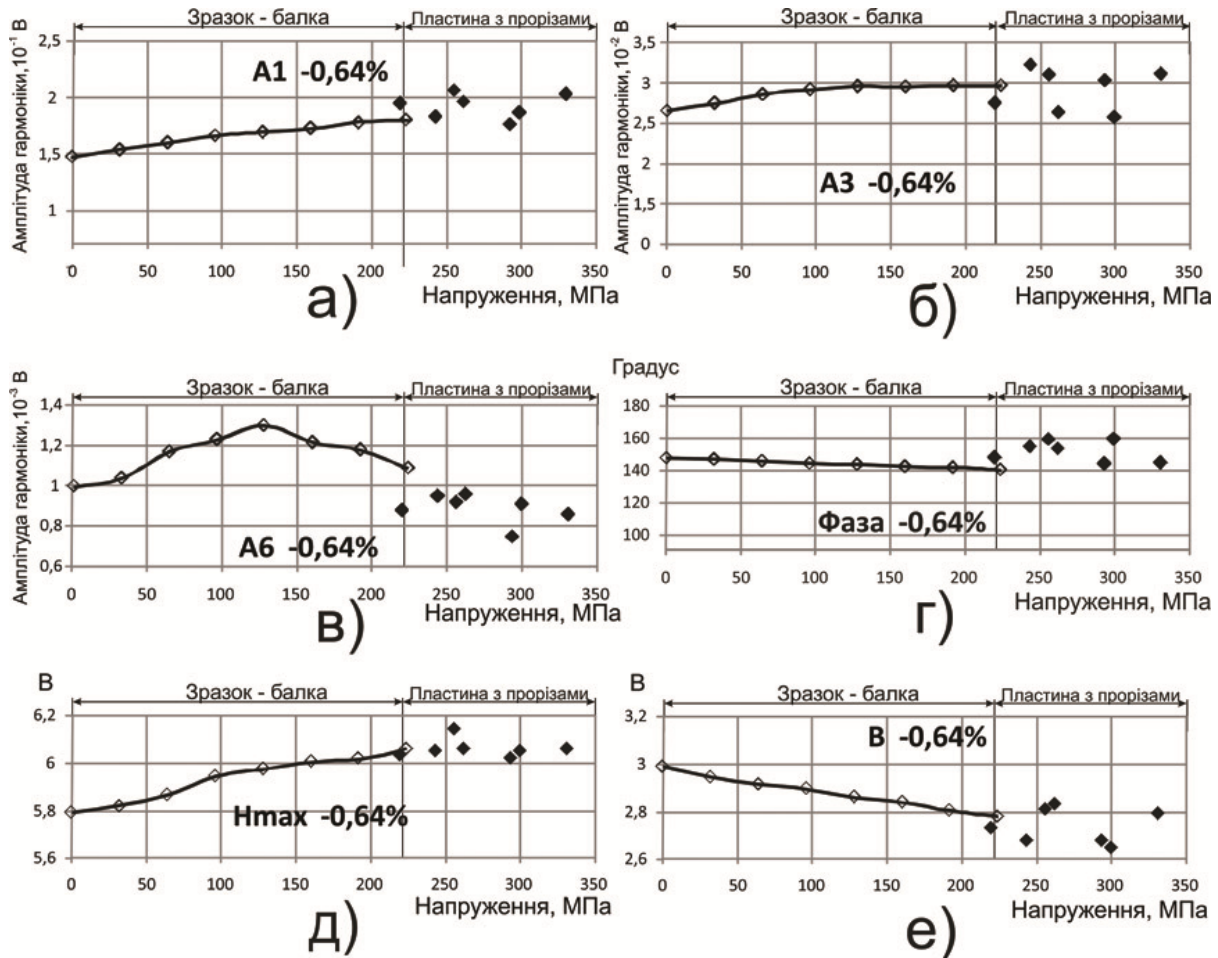


Рис.14 Співставлення даних на зразках-балках і на пластинах із прорізами: а) A1, б) A3, в) A6, г) фаза A1, д) Hmax, е) B. Отримані дані на пластинах із прорізами наведено точками, а отримані дані на зразках-балках - суцільними лініями.

Можна спостерігати, що дані, отримані на пластинах із прорізами, мають однакові тенденції з даними, отриманими на ЗБ.

Також проведені дослідження сигналів інформативних параметрів методів МА та ПП на зварному шві (рис.15).

Розподіл інформативних параметрів методів МА та ПП (рис.15 а,б,в,г,д,е), в цілому, відповідає класичному розподілу залишкових напружень та деформацій у пластичній зоні ЗЗ. Винятком є ділянка самого зварного шва, де літа структура відрізняється від основного металу (параметри: Hmax, S, A1, A3, A6). Крім того, опуклість зварного шва також вносить збурення в сигнали.

Розподіл залишкових пластичних деформацій зварного шва, розрахований по параметрам B та Hmax, має традиційний характер (рис.15 л, к). Ширина зони пластичного деформування є меншою ніж ширина зони напружень розтягу. Це відповідає класичним уявленням та може додатково зменшуватись від усереднення вимірів параметрів на базі вимірювання перетворювача шириною 5 мм. Найбільші значення пластичних деформацій на основному металі сягають 1,2%, що також відповідає традиційним уявленням.

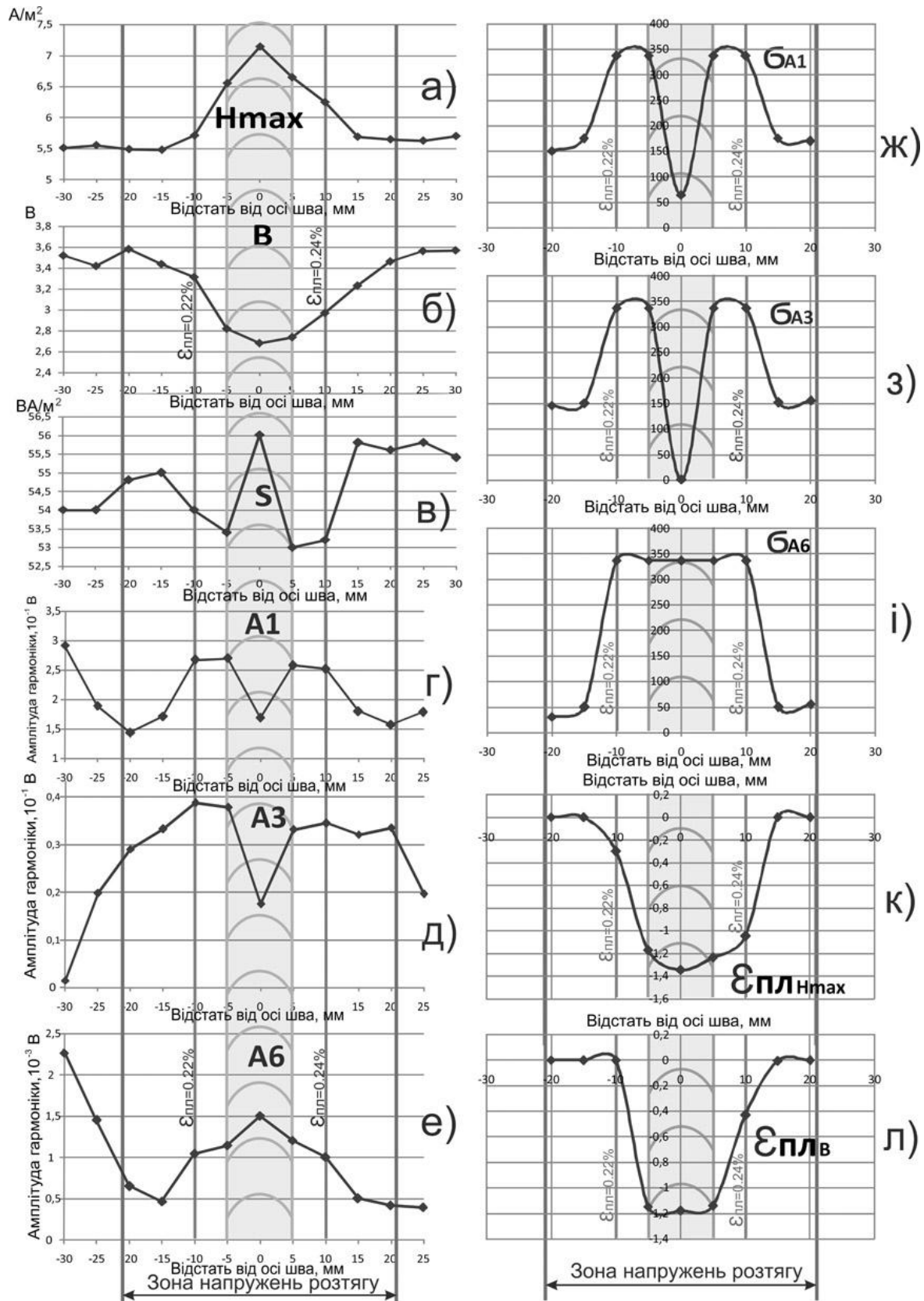


Рис.15 Залежності інформативних параметрів методів МА та ПП на зварному шві і розрахунки пластичних деформацій та залишкових зварювальних напружень (далі –ЗЗН): а)  $H_{max}$ , б)  $B$ , в)  $S$ , г)  $A1$ , д)  $A2$ , е)  $A3$ , ж) розподіл ЗЗН за  $A1$ , з) розподіл ЗЗН за  $A3$ , і) розподіл ЗЗН за  $A6$ , к) розподіл залишкових пластичних деформацій за  $H_{max}$ , л) розподіл залишкових пластичних деформацій за  $B$ .

Розподіл напружень розтягу, визначених по параметрам А1, А3 та А6, також має традиційний вигляд (рис.15 ж, з, і). У випадку, коли їх визначено по параметрам А1 та А3, вони мають мінімум на осі шва. Це можна пояснити литою структурою, яка має відмінні магнітні властивості від основного металу, та опуклістю зворотної сторони зварного шва (де проводились вимірювання). Виявлено, що ширина зони напружень розтягу, визначена по параметрам А1, А3 та А6, є меншою від визначеної приладом MESTR-411. Це можна пояснити усередненням вимірів параметрів на базі вимірювання перетворювача шириною 26 мм.

У **четвертому розділі** дисертації наведено розроблені апаратні рішення для реалізації вдосконаленого електромагнітного методу, а саме: новий комбінований перетворювач, новий прилад MESTR-501 та результати впровадження роботи.

Новий комбінований перетворювач запропоновано у двох варіантах. У першому намагнічуючий електромагніт доповнено обмотками намагнічування та вимірювання по методу ПП (рис. 16а). Для сканування конструкції по методу МА використовується напрям  $45^\circ$  від відносно намагнічуючого електромагніта, а для сканування по методу ПП – у напрямі намагнічуючого електромагніта.

В другому варіанті магнітоанізотропний перетворювач доповнено незалежним осердям 2 із обмоткою намагнічування 1 по методу ПП (рис.16 б, в). Таке рішення дозволяє не змінювати напрям сканування ЗК по методам МА та ПП. При цьому додаткове осердя 2 збільшує базу вимірювання перетворювача. На технічне рішення такого комбінованого перетворювача отримано патент на корисну модель [9].

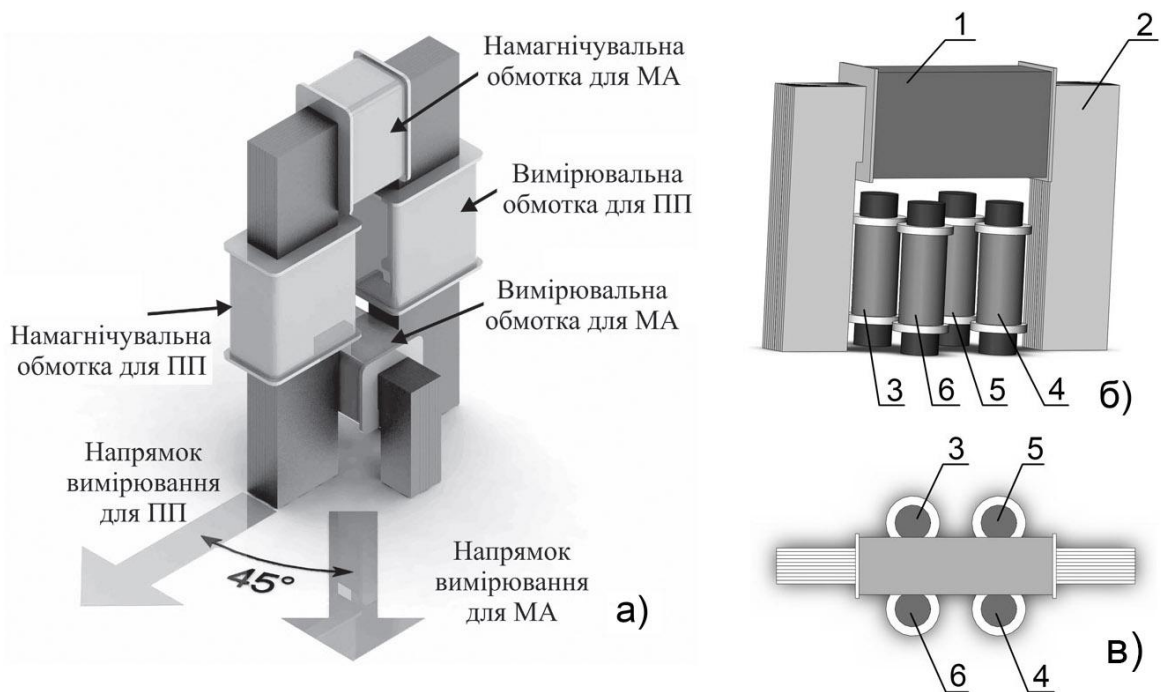


Рис. 16 Новий комбінований перетворювач: а) варіант 1, б), в) – варіант 2



До того, перетворювач МА виконано у вигляді чотирьох незалежних осердь 3,4,5,6 із універсальними обмотками (можуть використовуватись як для намагнічування, так і для вимірювання). Наприклад, для МА обмотки 3 та 4 (включаються узгоджено) є обмотками намагнічування, а 5,6 – обмотками вимірювання (включаються узгоджено). Для методу ПП обмотки 3 та 5 (як 6 та 4) включаються узгоджено і являють собою вимірювальні електромагніти.

Схема функціональна приладу MESTER -501 наведена на рис.17.

Прилад MESTR-501 запропоновано створити на базі промислового комп'ютеру, який виконує аналіз сигналів і розраховує деформації та напруження.

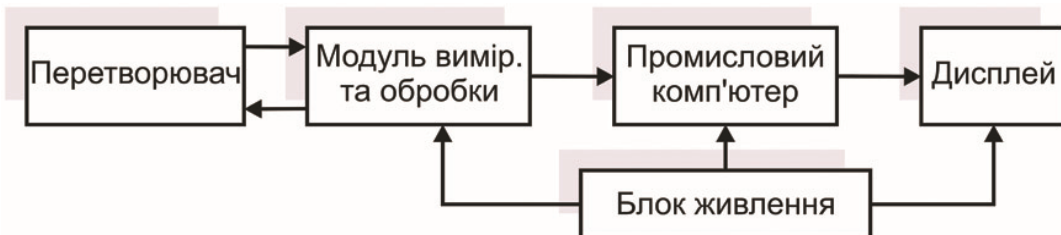


Рис. 17 Схема функціональна приладу MESTER -501

Прилад MESTER -501 складається із комбінованого перетворювача, модуля вимірювання та обробки сигналів, промислового комп'ютеру, активного монітору, акумуляторного блоку живлення.

Прилад компонується у корпусі, який може приймати два положення: робоче і транспортування. Таке рішення (рис.18 б,в) дозволяє переносити прилад у захищеному вигляді (дисплей повернуто на 180°). У робочому положенні корпус має можливість кріпитися на торсі робітника (оператора) завдяки пасам. Це дозволяє вивільнити руки оператора для можливості маніпулювання перетворювачем і утримання за елементи конструкції (рис.18а).

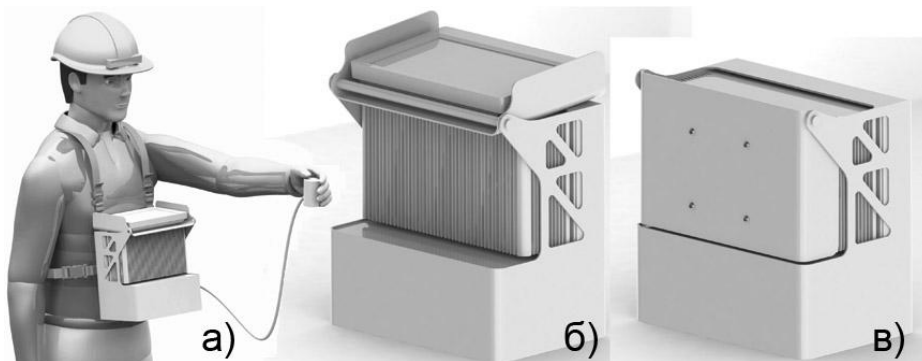


Рис. 18 Прилад MESTER – 501: а) - оператор з приладом MESTER-501, б) – робоче положення, в) - положення перенесення

Отримані дані оброблюються на місці в промисловому комп'ютері, зберігаються і виводяться на сенсорний екран. Корпус приладу виконано з вуглецевого композиту, що зменшує вагу приладу та збільшує його стійкість до ударів об елементи ЗК.

При практичній перевірці працездатності приладу під час виконання теми «Експериментальне дослідження напружень в зварних секціях залізнично-автомобільного мосту під час монтажу шляхом насування його через р. Дніпро», проводили дослідження напружень та деформацій у вертикальних стінках зварних секціях мосту (прогонової споруди) (рис. 19 а). Визначення напружень проводили у місцях до переكاتочного пристрою, на ньому і за ним. Для цього перетворювач доповнили спеціальним магнітним кріпленням (рис.19 б, в). Визначення напружень у зварних секціях прогонової споруди дозволили проводити оперативні дії для вирівнювання напружень у всіх стінках та провести успішне насування її із стапелю на опори (106 м).

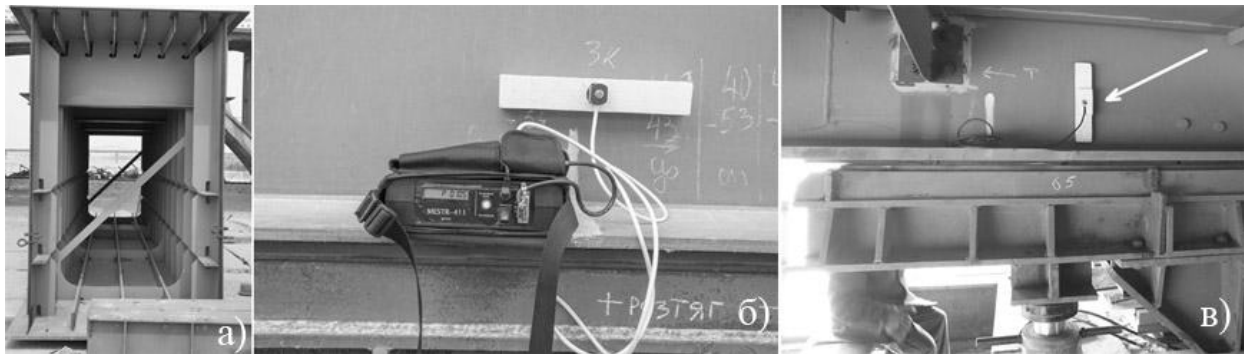


Рис. 19 Об'єкт для дослідної перевірки апаратури на мосту через р. Дніпро  
а) секція прогонової споруди, б) прилад MESTR-411 та перетворювач на стінці секції моста, в) встановлення перетворювача на стінку

До того при практичній перевірці працездатності приладу під час виконання теми «Оцінка напруженого стану судноперевантажувача СП-7.3», проводили дослідження напружень та деформацій в зварних секціях перевантажувача (рис. 20). Суднонавантажувач експлуатувався 30 років в умовах морського клімату, що спричинило корозію елементів конструкції. Ставилось завдання – дослідити напружено-деформований стан та зробити висновок щодо можливості подальшого експлуатування суднонавантажувача.



Рис. 20 Суднонавантажувач (а) і його схема (б)

Вимірювання напружень проводили на всіх зварних елементах конструкції суднонавантажувача: стрілі, траверсі, нижній рамі порталу, верхній рамі порталу, опорі, що хитається, розкосах, пілонах, балці оголовку. Як приклад, наведено розподіл напружень у двох перерізах траверси (рис. 21 а, б). Після аналізу отриманих даних було зроблено висновок, що напруження не перевищують рівня половини межі текучості. Пластичних деформацій зварних елементів конструкції, за винятком зварних швів, не знайдено. Зроблено висновок про можливість подальшої експлуатації суднонавантажувача.

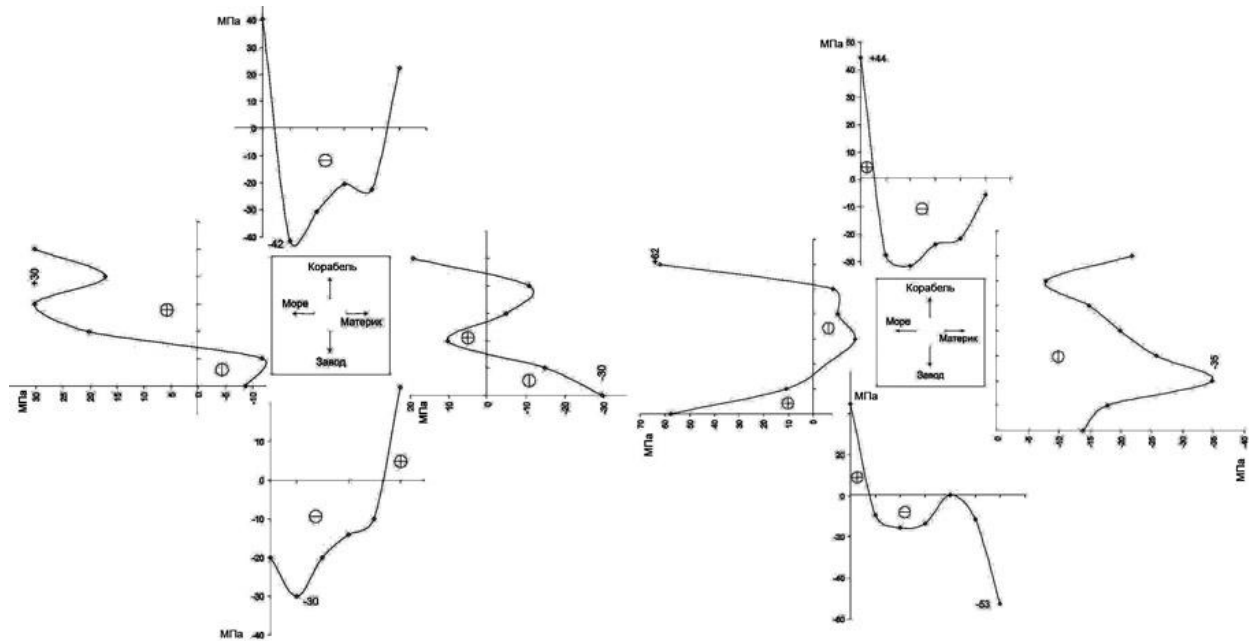


Рис. 21 Розподіл напружень у двох перерізах траверси

Результати роботи також впроваджені в навчальний процес студентів PhD по дисципліні «Діагностика та системи забезпечення якості».

## ВИСНОВКИ

1. Напружено-деформований стан пластичної зони зварних з'єднань та ділянок із пластичними деформаціями розтягу може бути кількісно оцінено шляхом сумісного гармонічного аналізу сигналу 4-х полюсного магнітоанізотропного перетворювача та параметрів петлі магнітного гістерезису.

2. Для визначення ступеню пластичного деформування стиснення у пластичній зоні зварних з'єднань електромагнітним методом доцільно використовувати В - половину перетину петлі гістерезису по осі індукції та Нmax - половину максимальної ширини петлі гістерезису по осі напруженості магнітного поля.

3. Для визначення напружень у пластичній зоні зварних з'єднань електромагнітним методом доцільно використовувати амплітуди першої А1, третьої А3 та шостої А6 гармонік.

4. Для визначення ступеню пластичного деформування у ділянках із пластичними деформаціями розтягу доцільно застосовувати Вmax –

половину максимальної висоти петлі магнітного гістерезису по осі індукції петлі гістерезису.

5. Для визначення напружень у ділянках із пластичними деформаціями розтягу доцільно використовувати фазу першої гармоніки A1 сигналу магнітоанізотропного перетворювача.

6. Розроблений прилад MESTR-501 має характеристики, які дозволяють із достатньою точністю визначити напружено-деформований стан на натурних зварних конструкціях електромагнітним методом.

7. Визначення гармонійних складових сигналу магнітоанізотропного перетворювача та параметрів петлі магнітного гістерезису забезпечується розробленим новим комбінованим перетворювачом у двох варіантах.

8. Проведена перевірка розробленого обладнання при будівництві залізнично-автомобільного мосту шляхом насування його через річку Дніпро, та на об'єктах ДП Укрхімтрансміак свідчить про доцільність його використання.

### **ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:**

1. Фомичев С.К. Автономная система мониторинга механических напряжений магистральных трубопроводов с использованием возможностей GSM связи/ С.К. Фомичев, С.Н. Минаков, М.А. Яременко, С.В. Михалко, А.В. Данильчик, А.С. Минаков //Техн. диагностика и неразруш. контроль. - 2008. - №1. – С. 9-12.

*Автором виконано розробка апаратних рішень.*

2. Фомичев С.К. Определение силовых воздействий на трубопровод по анализу эпюр распределения продольных напряжений / С.К. Фомичев, С.Н. Минаков, С.В. Михалко, М.А. Яременко, А.С. Минаков. //Техн. диагностика и неразруш. контроль. - 2009. - №2. – С. 11-14.

*Автором розроблено алгоритм визначення напружень вигину та проведено випробування на натурних об'єктах.*

3. Фомичев С.К. Сбор, накопление и визуализация данных мониторинга напряженного состояния магистральных трубопроводов/ С.К. Фомичев, А.Е. Пирумов, С.Н. Минаков, А.С. Минаков, А.В. Данильчик, С.В. Михалко, М.А. Яременко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, К., 2012, № 1, с. 49-52.

*Автором розроблено алгоритм розрахунку позовжніх напружень та проведено випробування на натурних об'єктах.*

4. Фомичев С.К. Обработка данных в системе мониторинга напряженного состояния магистральных трубопроводов / С.К. Фомичев, А.Е. Пирумов, С.Н. Минаков, А.С. Минаков, О.Л. Бабенко, В.А. Верпета, А.И. Евтухов // Технологические системы. – 2012. – №2(59). С.81-84.

*Автором розроблено алгоритм розрахунку позовжніх напружень та проведено випробування на натурних об'єктах.*

5. MONITORING OF TECHNICAL STATE OF TECHNOGENIC UNSAFE PIPELINES /S. Fomichov, S. Minakov, A. Minakov, A. Pirumov, M.

Shevchenko, Ie. Chvertko, O. Vovk // Наукоємні технології, № 2 (34), 2017, С.171-177.

*Автором розроблено алгоритм розрахунку поздовжніх напружень та проведено випробування на натурних об'єктах.*

6. Bastun Vladimir Monitoring of the technical state of a linear part of main pipelines by nondestructive express control methods / Vladimir Bastun, Elena Bepalova, Galina Urusova, Anton Minakov // Journal of Control Engineering and Technology, Vol. 4, Issue 2, April 2014, Pages 141-146. (іноземне видання)

*Автором розроблено принципи передачі та обробки даних моніторингу.*

7. Pirumov Andriy Application of Reverse Magnetization Method of Evaluating Stresses in Welded Structures / Andriy Pirumov, Mykola Shhevchenko, Anton Minakov, Sergiy Minakov, Yevgenia Chvertko // Journal of Materials Science and Technology (Bulgary) 2015, Vol. 23, No. 4, pp. 295–302. (іноземне видання)

*Автором запропоновано використання параметрів петлі магнітного гістерезису для визначення напружень, а саме: нормування напівперерізу петлі по осі поля шляхом розділення на величину найбільшого поля.*

8. Патент на корисну модель 100379 України, МПК G01L1/12, G01N27/72. Спосіб комплексного електромагнітного контролю структурного і напружено-деформованого стану феромагнітних матеріалів / В.М. Учанін, О.П. Осташ, С.М. Мінаков, Г.Я.Безлюдько, А.С. Мінаков - № у 2015 00420; Опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14.

*Автором запропоновано визначати структурну складову методом коерцитивної сил, а складову напружень – магнітоанізотропним методом.*

9. Патент на корисну модель України. МПК G01L1/12, G01N 27/72, G01R33/00 № UA 100405 U Електромагнітний перетворювач для комплексного контролю структурного і напружено-деформованого стану матеріалу конструкцій із феромагнітних сталей / В.М. Учанін, С.М. Мінаков, А.С. Мінаков, М.В. Сидоренко. Опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14.

*Автором запропоновано додатково у перетворювач перемagnetичування ввести магнітоанізотропний перетворювач.*

10. Патент на корисну модель України. МПК E01D 21/06, G01N 27/83 № UA 116454 U Спосіб поздовжнього насування пролітної конструкції під час будівництва мостів / В.М. Учанін, С.К. Фомичов, С.М. Мінаков, А.С. Мінаков, Б.О. Бобін. Опубл. 25.05.2017, Бюл. № 10.

*Автором запропоновано проводити вимірювання магнітної анізотропії до, на і після проходу прогонової споруди через перекаточний пристрій.*

11. Uchanin V. Elektromagnetyczne metody wyznaczania stanu naprezenia elementow konstrukcij ze staliferromagnetycznych / V. Uchanin, S. Minakov, A. Minakov // XXI Seminarum "Nieniszczace badania materialov", Zakopane, 18-20 marca, 2015.

*Автором розроблено апаратні рішення для електромагнітного методу, проведено експериментальні дослідження та їх аналіз.*

12. Evaluating of Stresses in Welded Structures by means of Reverse Magnetization Method/ Andriy Pirumov, Mykola Shhevchenko, Anton Minakov,

Sergiy Minakov, Yevgenia Chvertko, Maksym Ziberov // POSMEC, 2016, Uberlandia. Anais do POSMEC 2016 Simposio do Programa de Pos - Graduacao em Engenharia Mecanica, 2016, P.1-5

*Автором запропоновано проводити визначення пластичної деформації за параметрами перемагнічування.*

13. Пірумов А.Є. Система моніторингу технічного стану магістральних трубопроводів для підвищення екологічної безпеки / Пірумов А.Є., Шевченко М.В., Чвертко Є.П., Мінаков А.С., Мінаков С.М.// IX Міжнародна науково-тех-нічна конференція «Енергетика. Екологія. Людина», Київ, 8 грудня 2016 р., С. 31

*Автором запропоновано алгоритм визначення напружено-деформованого стану магістральних трубопроводів.*

14. Шмигельський С.В. Визначення пластично-деформованої ділянки зварних конструкцій по сигналу магнітоанізотропного перетворювача/ С.В. Шмигельський, А.С. Мінаков, А.Є. Пірумов, М.В. Шевченко, С.М. Мінаков // Досконалість зварювання – комплексний підхід: тези доп. X Всеукр. наук.-техн. конф. / Україна, Київ, 26 травня 2016 р. – К. НТУУ «КПІ», 2016. – 24с.

*Автором запропоновано використовувати фазу першої гармоніки магнітоанізотропного перетворювача для визначення пластично-деформованої ділянки зварних конструкцій.*

15. Шмигельський С.В. Компенсація дебалансу магнітоанізотропного перетворювача / С.В. Шмигельський, А.С. Мінаков, А.Є. Пірумов, М.В. Шевченко, С.М. Мінаков // Досконалість зварювання – комплексний підхід: тези доп. X Всеукр. наук.-техн. конф. / Україна, Київ, 26 травня 2016 р. – К. НТУУ «КПІ», 2016. – 24с.

*Автором запропоновано проводити векторне віднімання дебалансу на відміну від скалярного.*

16. Прохоренко В.М. Кріплення магнітоанізотропних перетворювачів на магістральних трубопроводах/ В.М. Прохоренко, А.С. Мінаков // Зварювання та споріднені процеси і технології: Матеріали другої всеукраїнської міжгалузевої науково-технічної конференції студентів, аспірантів та наукових співробітників: - Київ, 4-6 березня 2009 , С. 96-97.

*Автором запропоновано принципи кріплення магнітоанізотропних перетворювачів для моніторингу напружено-деформованого стану магістральних трубопроводів.*

17. Прохоренко В.М. Моніторинг напруженого стану магістральних трубопроводів із використанням GSM зв'язку/ В.М. Прохоренко, А.С. Мінаков //Зварювання та споріднені процеси і технології: Матеріали третьої всеукраїнської міжгалузевої науково-технічної конференції студентів, аспірантів та наукових співробітників: - Київ, 31 березня – 2 квітня 2010, С. 60-61.

*Автором розроблено алгоритм роботи автономного вузла моніторингу напруженого стану магістральних трубопроводів із використанням GSM зв'язку.*

18. Мінаков А.С. Багатопараметровий магнітний контроль напружено-деформованого стану зварних конструкцій\ А.С. Мінаков, А.Є. Пірумов, М.В. Шевченко, С.М. Мінаков, С.В. Шмигельський // Зварювання та споріднені процеси і технології: Матеріали восьмої всеукраїнської міжгалузевої науково-технічної конференції студентів, аспірантів та наукових співробітників: - К.: НТУУ „КПІ”, «МП Леся», 2015. – С. 24.

*Автором запропоновано проводити гармонічний аналіз сигналу магнітоанізотропного перетворювача.*

19. Фомічев С.К. Дослідження взаємозв'язку коерцитивної сили із ступенем пластичного деформування феромагнітних сталей/ С.К. Фомічев, С.М. Мінаков, А.С. Мінаков // Четверта Всеукраїнська міжгалузева науково-технічна конференція студентів, аспірантів та наукових співробітників: «Зварювання та споріднені процеси і технології», Київ, 31 березня – 2 квітня 2010, С. 62-63.

*Автором проведено аналіз експериментальних даних зв'язку коерцитивної сили із ступенем пластичного деформування.*

20. Мінаков А.С. Моніторинг напруженого стану магістральних трубопроводів із використанням GSM зв'язку/А.С. Мінаков, О.В. Данильчик //V Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів "Зварювання та суміжні технології": Тези доповідей. – К.: ІЕЗ ім. Є.О.Патона, НАНУ.– 2009.– С.206.

*Автором розроблено алгоритм роботи автономного вузла моніторингу напруженого стану магістральних трубопроводів із використанням GSM зв'язку.*

21. Прохоренко В.М. Експериментальне дослідження напружень в зварних секціях залізнично-автомобільного мосту під час монтажу шляхом насування його через р. Дніпро / В.М. Прохоренко, А.С. Мінаков, Б.О. Бобін // П'ята Всеукраїнська міжгалузева науково-технічна конференція студентів, аспірантів та наукових співробітників: «Зварювання та споріднені процеси і технології», Київ, 18 -20 квітня 2012, С. 77-78

*Автором проведено аналіз експериментальних досліджень напружень в зварних секціях залізнично-автомобільного мосту.*

22. Фомічев С.К. Визначення коерцитивної сили за допомогою магнітоанізотропного перетворювача/ С.К. Фомічев, А.С. Мінаков // Шоста Всеукраїнська науково-технічна: «Досконалість зварювання – комплексний підхід», Київ, 24 -25 квітня 2012, С. 77-78

*Автором запропоновано визначати коерцитивну силу за максимальною магнітною проникливістю.*

23. Пірумов А.Є. Оцінка величини пластичної деформації за допомогою параметрів перемагнічування / Пірумов А.Є., Шевченко М.В, Мінаков А.С., Мінаков С.М.// Сьома Всеукраїнська міжгалузева науково-технічна конференція студентів, аспірантів та наукових співробітників: «Зварювання та споріднені процеси і технології», Київ, 16 травня 2013, С. 4

*Автором запропоновано визначати пластичну деформацію за шириною, висотою та площею магнітного гістерезису.*



24. Пірумов А.Є. Дослідження впливу величини пластичної деформації та напружень на параметри шумів Баркгаузена / Пірумов А.Є., Шевченко М.В., Мінаков А.С., Мінаков С.М.// Восьма Всеукраїнська науково-технічна: «Досконалість зварювання – комплексний підхід », Київ, 20 травня 2014

*Автором запропоновано визначати настання пластичного деформування по зміні виду розподілення шумів Баркгаузена при вимірювання вздовж деформації.*

25. Пірумов А.Є. Дослідження впливу величини пластичної деформації та напружень на параметри перемагнічування / Пірумов А.Є., Шевченко М.В., Мінаков А.С., Мінаков С.М.// Сьома Всеукраїнська міжгалузева науково-технічна конференція студентів, аспірантів та наукових співробітників: «Зварювання та споріднені процеси і технології», Київ, 14-16 травня 2014, С. 4

*Автором запропоновано визначати пластичну деформацію за параметрами: напівшириною по осі поля та напіввисотою перетину по осі індукції магнітного гістерезису.*

### АНОТАЦІЯ

Мінаков А.С. Експериментальне визначення напружено-деформованого стану зварних з'єднань електромагнітним методом – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 - зварювання та споріднені процеси і технології - Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", МОН України, Київ, 2018.

Дисертація присвячена вдосконаленню електромагнітного методу для оцінювання напружень та деформацій у пластичній зоні зварних з'єднань і у пластично-деформованих (розтягом) інших ділянках зварних конструкцій.

На основі експериментальних досліджень плоских зразків сталі 09Г2С товщиною 4 мм для визначення ступеню пластичного деформування стиснення у пластичній зоні зварних з'єднань запропоновано застосовувати параметри петлі магнітного гістерезису: половину перетину по осі індукції та напівширину по осі поля, а для визначення напружень - параметри: амплітуди першої, третьої та шостої гармонік магнітоанізотропного перетворювача. Запропоновано для визначення ступеню пластичного розтягу використовувати напіввисоту по осі індукції петлі магнітного гістерезису, а для визначення напружень розтягу - фазу першої гармоніки сигналу магнітоанізотропного перетворювача.

Розроблено апаратні рішення для вдосконаленого електромагнітного методу та впроваджено результати роботи при будівництві залізнично-автомобільного мосту, на об'єктах ДП Укрхімтрансміах та учбовому процесі.

Ключові слова: пластичні деформації, напруження, зварні конструкції, магнітоанізотропний перетворювач, петля магнітного гістерезису, гармоніки, пластична зона зварних з'єднань.



## АННОТАЦИЯ

Минаков А.С. Экспериментальное определение напряженно-деформированного состояния сварных соединений электромагнитным методом – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.06 – сварка и родственные процессы и технологии. Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», МОН Украины, Киев, 2018.

Диссертация посвящена совершенствованию электромагнитного метода для оценки напряжений и деформаций в пластически-деформированных зонах сварных конструкций. Рассматривалось два случая: остаточные сварочные деформации и напряжения в пластической зоне сварных соединений (пластические деформации сжатия и напряжения растяжения) и пластические деформации растяжения и растягивающие напряжения в других участках сварных конструкций.

Проведены экспериментальные исследования влияния пластических деформаций и напряжений плоских образцов стали 09Г2С толщиной 4 мм на гармонические составляющие сигнала магнитоанизотропного преобразователя и параметры петли магнитного гистерезиса.

Пластическую деформацию сжатия создавали путем нагревания образца газовой горелкой до температур 650-750°C. Пластические деформации растяжения создавали на специально разработанной машине с использованием ручного гидравлического домкрата. Растягивающие напряжения создавали с помощью установки для чистого изгиба плоских образцов.

На основе экспериментальных исследований доказано, что напряженно-деформированное состояние пластической зоны сварных соединений и участков с пластическими деформациями растяжения может быть количественно оценено путем совместного гармонического анализа сигнала 4-х полюсного магнитоанизотропного преобразователя и параметров петли магнитного гистерезиса.

Предложено для определения степени пластического деформирования сжатия в пластической зоне сварных соединений электромагнитным методом целесообразно применять параметры петли магнитного гистерезиса: половину сечения по оси индукции и полуширину по оси поля. Для определения напряжений в пластической зоне сварных соединений электромагнитным методом целесообразно применять параметры: амплитуды первой, третьей и шестой гармоник магнитоанизотропного преобразователя.

Предложено для определения степени пластического растяжения в сварных конструкциях применять полувысоту по оси индукции петли магнитного гистерезиса преобразователя параметров перемагничивания. Для определения напряжений растяжения в этих участках целесообразно

применять фазу первой гармоники сигнала магнитоанизотропного преобразователя.

Разработан прибор MESTR-501 для определения напряженно-деформированного состояния электромагнитным методом на натурных сварных конструкциях.

Предложен новый комбинированный преобразователь в двух вариантах для определения гармонических составляющих сигнала магнитоанизотропного преобразователя и параметров петли магнитного гистерезиса.

Внедрены результаты работы при продвижке пролетного строения во время строительства железнодорожно-автомобильного моста путем продвижки его через р. Днепр, на объектах ГП Укрхимтрансаммиак и учебном процессе.

Ключевые слова: пластические деформации, напряжения, сварные конструкции, магнитоанизотропный преобразователь, петля магнитного гистерезиса, гармоники, пластическая зона сварных соединений.

### ANNOTATION

Minakov A.S. Experimental determination of the stress-strain state of welded joints by electromagnetic method. – Manuscript.

The thesis for a candidate of technical sciences degree in speciality 05.03.06 - welding and related processes and technologies. – National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute the name of Igor Sikorsky”, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, – 2018.

The dissertation is devoted to the improvement of the electromagnetic method for the evaluation of stresses and deformations in the plastic zone of welded joints and in plastic-deformed (stretching) other sections of welded structures.

On the basis of experimental studies of flat samples of 09Г2С steel with a thickness of 4 mm, to determine the degree of plastic deformation of compression in the plastic zone of welded joints, it is proposed to apply the parameters of the magnetic hysteresis loop: half the section along the induction axis and the half width along the field axis, and for the determination of the stresses, the parameters: amplitude first, third, and sixth harmonics of a magnetic anisotropic converter. It is proposed to use a half-height parameter for determining the degree of plastic stretching along the induction axis of the magnetic hysteresis loop, and for the determination of the tensile stresses, the phase of the first harmonic of the signal of the magneto anisotropic converter.

The hardware solutions for the advanced electromagnetic method were developed and the results of work were implemented in the construction of the railway and road bridge, on the objects of DP Ukrchimtransamiak and in the educational process.

Key words: plastic deformations, stresses, welded structures, magnetic anisotropic converter, loop of magnetic hysteresis, harmonics, plastic zone of welded joints.