

Жидков А.Б.

## ПРИЛАД ДЛЯ МАГНІТНОЇ ДІАГНОСТИКИ ВТОМНИХ ПОШКОДЖЕНЬ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

*В статті викладено принципи побудови приладу для магнітної діагностики втомних пошкоджень металокопструкцій. Наведено обґрунтування зв'язку між залишковим намагнічуванням та пластичною деформацією ділянок металу в зоні зародження втомної тріщини. Наведено загальну схему приладу та результати випробувань методу, який будується на використанні залишкового намагнічування металу на сталевих зразках.*

**Ключові слова:** пластична деформація, ступень накопичення втомних пошкоджень, концентрація напруг, магнітометрія, залишкове намагнічування

**Актуальність дослідження.** Визначення залишкового ресурсу та працездатності металокопструкцій, які піддаються періодичному навантаженню – складна технічна задача, яка досі остаточно не вирішена. Втомне руйнування є небезпечним через скритий процес накопичення втомних пошкоджень, який не супроводжується зовнішніми проявами. Непередбачуване руйнування частини механізму, або копструкції наносить великі збитки і тому створення засобів діагностики втомних пошкоджень для елементів металокопструкцій, яким притаманно втомне руйнування є дуже актуальним. Особливо важливим є визначення стадій руйнування, які дозволяють спрогнозувати подальший час безпечного експлуатування механізму, або копструкції.

**Постановка проблеми.** Накопичення втомних пошкоджень, тобто концентрація напруги зоні зростання тріщини, зміна дислокаційної структури, доменної будови металу та його механічних властивостей, перш за все пластичності в зоні, яка є зоною зародження та початкового росту втомної тріщини не можуть бути визначені безпосередньо. Тому використовуються різного роду опосередковані методи, оцінки стану металу в «небезпечній зоні». Одним з перспективних методів на думку автора є використання магнітної діагностики, а саме визначення залишкового намагнічування в якості інформативного параметру, який характеризує ступень накопичення втомних пошкоджень і може бути використаний для оцінки працездатності деталі механізму. Або копструкції.

**Теоретичний аналіз дослідження.** Оцінка ступеня втомного пошкодження проводиться різними методами [1-5] які мають певні недоліки та обмеження. Магнітометричні методи мають багато переваг, але використання їх гальмується через недостатнє розуміння фізичних основ цих методів, особливостей їх застосування та малу кількість досліджень і розробок в цій галузі, основні з яких спрямовано на визначення дефектів типу несучільностей металу типу пір, тріщин, тощо.

**Мета роботи.** В статті викладено принципи побудови приладу для визначення ступеня втомних пошкоджень та наведено його схему і результати випробувань на сталевих зразках.

У роботі [6] розглянута фізична сутність втомного пошкодження металу і запропонована модель розвитку цього процесу.

Основні висновки з запропонованої моделі полягають в наступному:

- розвиток процесу втомного руйнування супроводжується зміною локальної щільності металу, що реалізується через появу областей зі зниженою і підвищеною щільністю;
- метал руйнується в зоні концентрації напруг через зменшення своєї щільності або розпушення;
- процес руйнування починається в підповерхневому шарі і розвивається вглиб металу;
- накопичення втомних пошкоджень і розвиток процесу руйнування - це збільшення частки розпушеного шару металу на поверхні виробу і в його обсязі.

Встановлено, що втомне руйнування металу має три фази:

перша - підготовча, яка полягає в перерозподілі поздовжніх неоднорідностей деформації, які вишиковуються в існуючих умовах в «зручну» для металу періодичну послідовність; процес у цій фазі розвивається у двох напрямках - в глибину і довжину, характеризується порівняно високою швидкістю, і триває порівняно недовго - 1,0 - 1,5 % від граничної кількості циклів;

друга - основна - накопичувальна, що характеризується дуже повільним плином процесу розвитку в одному напрямку - в глибину (від одиниць до десятків мікрон) і триваюча дуже довго – 90 – 95 % від граничної кількості циклів;

третья - фінальна, що протікає дуже швидко і яка веде до виникнення в «випадковому місці» мікротріщини і розвитку її з дуже високою швидкістю в глибину і довжину і перетворенню її в макротріщину.

На рівні дислокаційної структури в металі процеси відбуваються процеси формування стійких дислокаційних структур з високою щільністю. Під час пластичної деформації в ділянках металу значно зростає кількість дислокацій і вони починають інтенсивний рух вздовж ліній ковзання відповідно до прикладених навантажень.

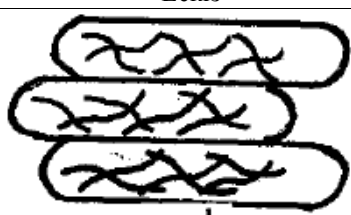
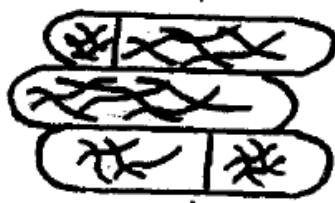


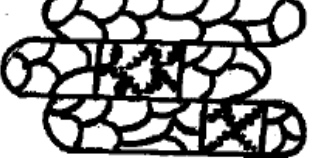
При цьому русі дислокації стикаються з різного роду бар'єрами. І при циклічному навантаженні дислокаційна структура приймає стійкий вигляд, у наслідок упорядкування «загальмованих» дислокацій. Одним з найбільш розповсюдженим бар'єром для дислокації є інша дислокація того ж знаку. На кінцевій стадії втомного руйнування, коли можливості пластичної деформації практично вичерпано ми будемо мати впорядковану дислокаційну структуру із значною кількістю дислокацій, що згруповано біля бар'єрів.

Загалом дислокаційні структури поділяються на різні типи, але розгляд їх виходить за межі даної роботи. Нам більш цікаві зміни у структурі, які виникають внаслідок процесу генерації та руху дислокацій.

Для мартенситу ці структури у порядку виникнення по мірі зростання ступеня деформації ескізно наведено у табл. 1.

Тобто в результаті перебудови дислокаційної структури відбувається подрібнення зерених складових, що підвищує структурну і розмірну стабільність внаслідок зростання супротиву деформації.

Таблиця 1  
Основні типи впорядкованих дислокаційних структур на прикладі мартенситу

Тип структури	Ескіз
Нефрагментовані рейки з сітчастою субструктурою	
Утворення первинних фрагментів з сітчастою субструктурою	
Перетворення фрагментів з сітчастою субструктурою у фрагменти з осередковою структурою	
Утворення вторинних бездислокаційних фрагментів	
Повністю фрагментовані мартенситні рейки	

Для феритних сталей відбувається подібні процеси. Необхідно зазначити, що підвищення кількості дислокацій у металі однозначно призводить до зміни величини коерцитивної сили. Тому в багатьох методах діагностики напружено-деформованого стану в якості інформативного параметру використовують коерцитивну силу.

Використання коерцитивної сили в якості інформаційного параметру потребує перемагнічування ділянки металу в процесі вимірювання, що вимагає застосування апаратури з певними параметрами щодо потужності, частоти перемагнічування і т.п. Тому в деяких випадках для експерс діагностики більш доцільно використовувати інші магнітні величини.

Оскільки реальний механізм, або конструкція постійно знаходиться в магнітних полях, то його намагнічування відбувається постійно. Але зміна коерцитивної сили та інших магнітних властивостей в окремих ділянках призводять до того, що вони намагнічуються, або розмагнічуються суттєво по-різному. Тому залишкова намагніченість ділянок металу є своєрідним записом «історії» намагнічування та навантаження і може бути застосована в якості інформативного параметру.

На цьому базується спосіб визначення ступеня втомних пошкоджень, який засновано на ефекті – магнітопластики, що лежить в основі метода магнітної пам'яті металу [4, 5]. Для цього використовується діаграма магніто-механічного стану феромагнетика при взаємодії силових і магнітних полів. Запропонований спосіб був реалізований, наприклад у тестовому зразку приладу, який розроблено у ВП «НДІ «Іскра» СЧУ ім. В. Даля [7].

Схема приладу наведено на рис. 1.

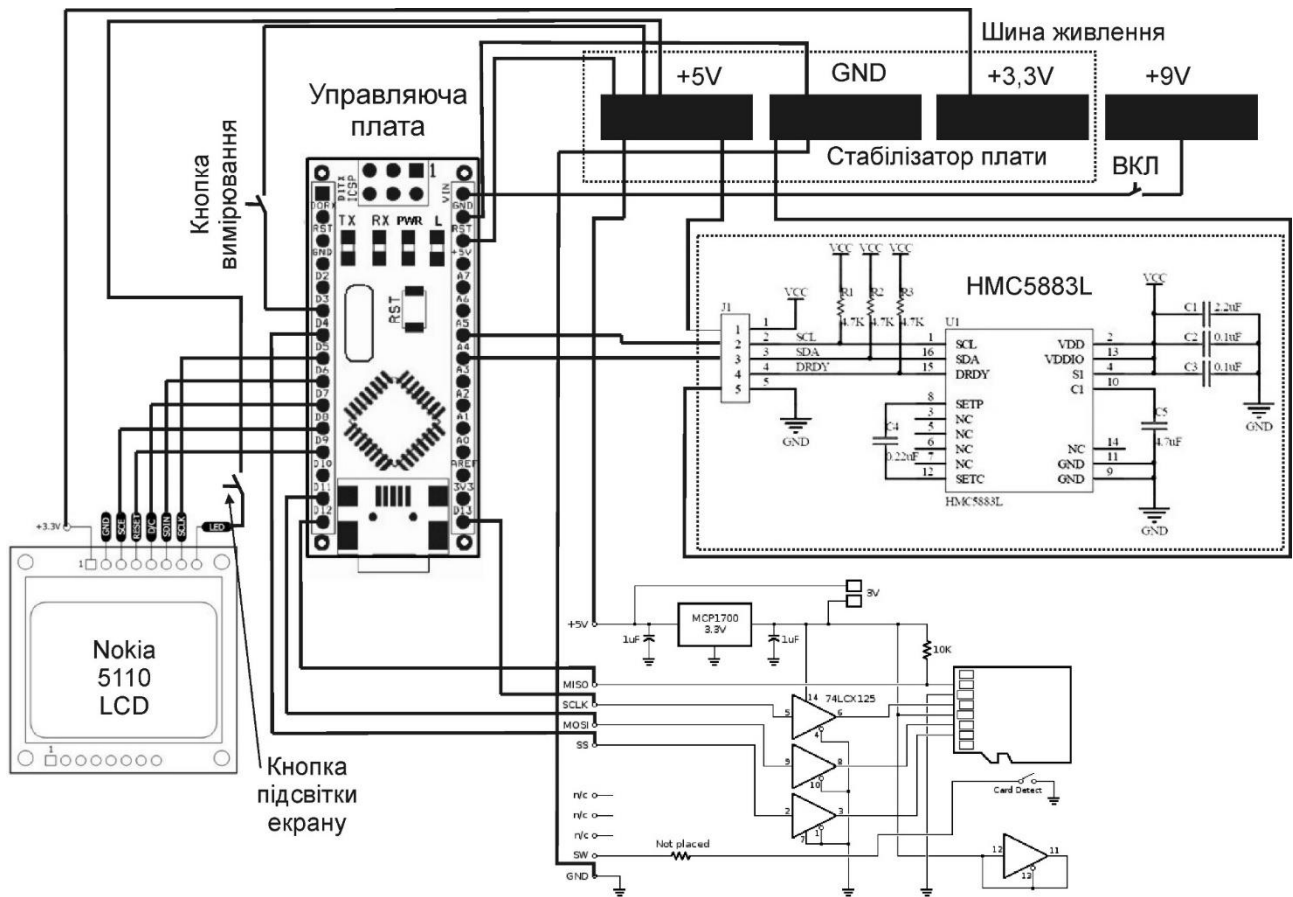


Рис. 1. Загальна схема приладу для магнітної діагностики ступеня втомних пошкоджень

Прилад дозволяє з високою точністю вимірювати напруженість магнітного поля на поверхні металокопункції одночасно в трьох просторових координатах.

В якості сенсора для вимірювання магнітного поля було використано модуль на основі чутливого елемента HMC5883L.

Було проведено тестування приладу на зразках з низьковуглецевої сталі. Було використано зразки типу «смуга», «квадрат» та «профільна труба». На них було створено імітації різних дефектів, що мають місце в реальних металокопункціях (рис. 2, 3).

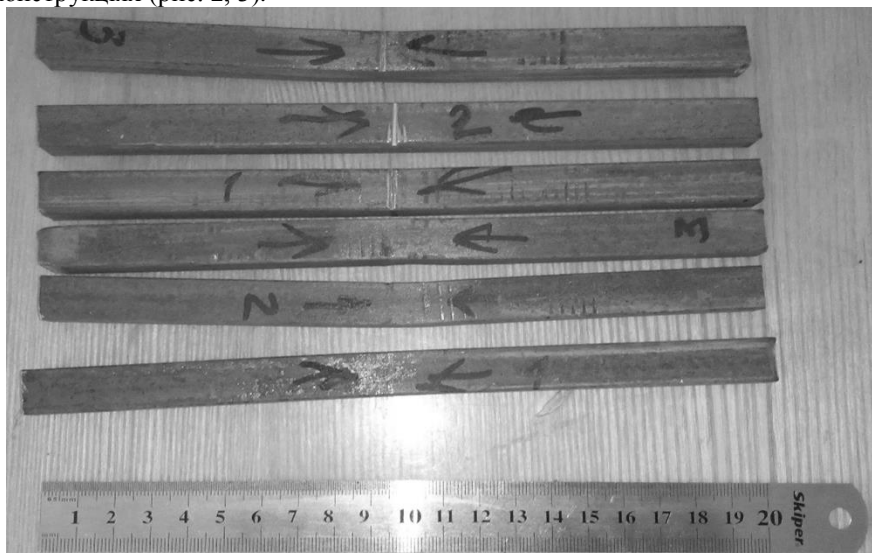


Рис. 2. Зразки типу «квадрат»

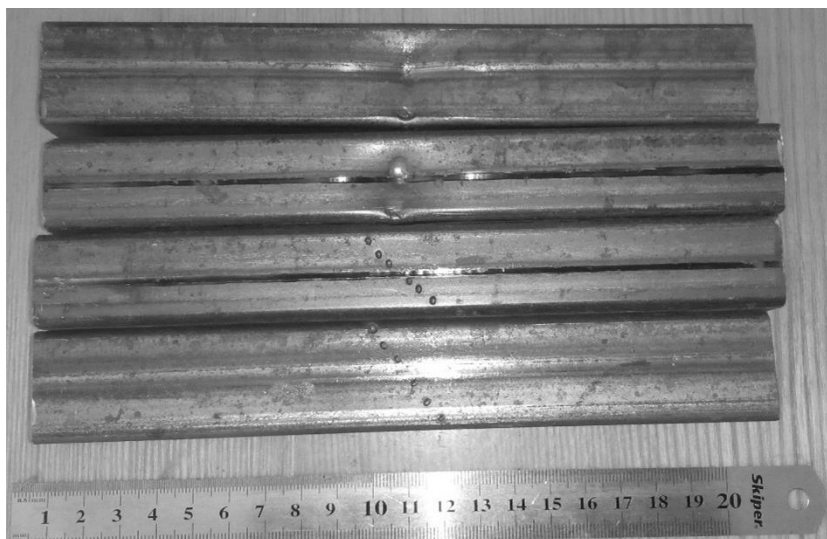


Рис. 2. Зразки типу «профільна труба»

Було досліджень наступні дефекти:

локальне та розподілене корозійне пошкодження;

імітація пори (свердлення);

імітація поверхневої тріщини у стадії зароджування (надріз);

імітація макротріщини (розрив);

зварні шви з повним проваром;

зварні шви з великим непроваром;

зварні шви з закритим маленьким непроваром (розмір на поперечном перерізі 0,1x0,5 мм);

зварні шви з поодинокую порою (свердлення);

локальна місцева пластична деформація різного ступеня, що спричинена ударною та статичною дією.

Тестування приладу на обраних зразках виявило наступну закономірність. Природні окисні плівки невеликої товщини та лакофарбові покриття суттєво не впливають на чутливість приладу. Товсті покриття, особливо, ті, що місцями відшаровуються погіршують чутливість приладу. Граничною межею можна вважати 1 мм, при якому чутливість зменшується вдвічі.

Тому, для надійної діагностики металокопструкції необхідно зняти на ділянках, які обстежуються старі багат шарові лакофарбові покриття. Тонкий шар іржі, окисні плівки, та «свіжі» лакофарбові покриття на чутливість приладу практично не впливають.

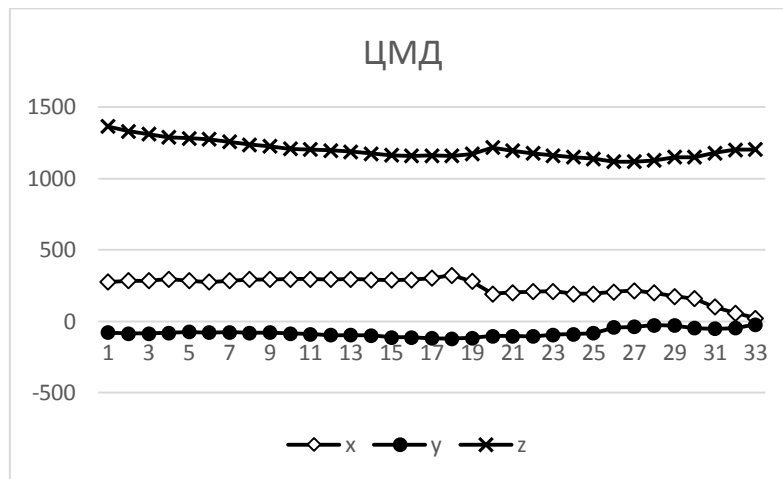
Випробування довели, що незначні відхилення датчика при ручному переміщенні при відкості руху у межах 0 – 20 мм/с не впливає на чутливість приладу.

При випробуванні на зразках було встановлено чутливість приладу до відносного розташування «дефекту». Для надійного його знаходження необхідно вести сканування поперек розташування дефекту. Найбільш невдалий напрямок – під кутом 45 градусів відносно повздовжньої осі дефекту.

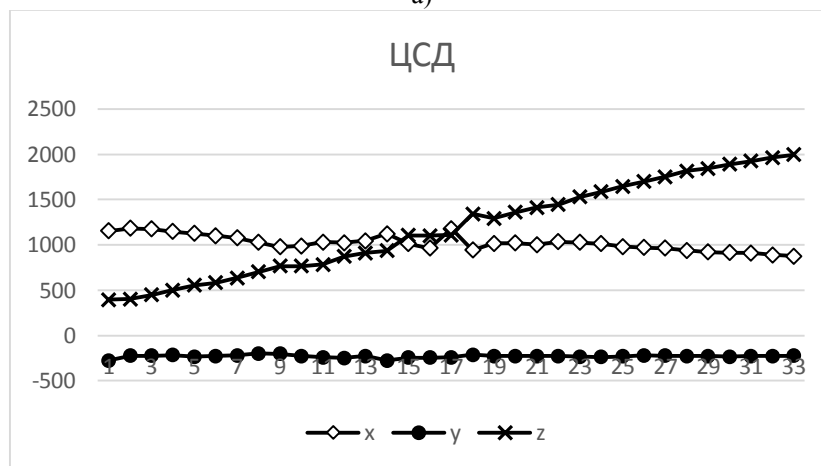
Результати випробування приладу та методу довели, що прилад чутливо реагує на локальне значне зменшення перетину зразку. Тобто чутливість до дефектів типу тріщина, пора, непровар, тощо дуже висока. Як було показано раніше має значення розташування дефекту відносно напрямку сканування. Бажано сканувати в напрямку, поперек тріщини чи непровару. Якщо вірогідний напрямок дефекту визначити складно, необхідно проводити сканування у щонайменше у двох взаємно перпендикулярних напрямках.

Прилад суттєво по-різному реагує на ділянки металу, який було деформовано із різною швидкістю. Місця, де метал був деформований швидко – мають набагато більш виражені зміни у магнітному полі, ніж місця, де метал був деформований статичним повільно навантаженням.

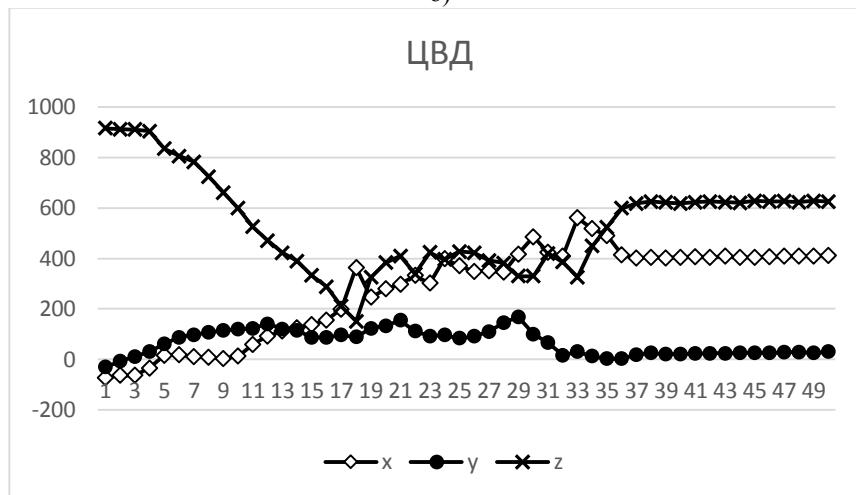
На рис. 4. наведено отримані криві залишкового намагнічування для пластично-деформованих зон, які дозволяють виявити ділянки із значної пластичною деформацією внаслідок накопичення втомних пошкоджень.



а)



б)



в)

Рис. 4. Магнітне поле суцільних зразків із різним ступенем пластичної деформації:  
а) – мінімальна деформація; б) – середня деформація; в) – значна деформація із подовженням тріщини.

Фіксація результатів вимірів у цифровому вигляді дозволила згодом проаналізувати дані та побудувати діаграми, які у тривимірному вигляді відображають зміну напрямку вектору напруження магнітного поля. Виявилось, що такий спосіб представлення інформації є більш інформативним, бо дозволяє чітко відокремити дефекти, які пов'язані з порушенням суцільності металу від дефектів структури, які характерні саме для втомних пошкоджень. Встановлено, що ділянка із зоною пластичної деформації, але без порушення суцільності металу, характеризується значною зміною напрямку вектору магнітної напруженості, але ця зміна відбувається плавно. При виникненні втомленої тріщини, тобто порушенні цілісності металу, спостерігається різка зміна, як напрямку, так і величини вектору магнітної напруженості. Така ж картина характерна для дефектів типу пір, тріщин,

підрізів, тощо. На останній стадії втомного руйнування при критичній величині тріщини-зародка втомного руйнування на траєкторії вектору з'являються ділянки з різкими змінами величини та напрямку.

**Висновки.** Розроблений спосіб діагностики ґрунтується на зв'язку між магнітними характеристиками та внутрішньою металу, яка формується в результаті деформаційних процесів. Остаточна намагнічуваність є своєрідним записом, який формується під час всього часу роботи металокопункції і відображає історію навантаження та впливу магнітних полів. Розроблений прилад реалізує запропонований метод. Досліди проведені на багатьох зразках підтверджують, що такі особливості характерні для багатьох дефектів і переддефектних станів в феромагнітних сталях. Запропонований спосіб та прилад мають гарну перспективу для удосконалення через малі габарити, вагу, високу чутливість та можливість використання сучасних методів обробки сигналу та візуалізації результатів.

#### Література

1. Патент України №103155, G01R 33/02, опубл. 10.12.2015, бюл. №23. Диференційний ферозонд / Смирний М.Ф., Марченко Д.М., Шапран Є.М., Бойко Г.О. та ін.
2. Патент України № 59259 G01N 27/90, опубл. 15.03.2001, бюл. № 2. Прокідний електромагнітний перетворювач для контролю сталевих канатів / Бережинський В.І., Брюханов О.М., Софієв В.М. та ін.
3. Швець С. М. Поєднання електромагнітного і магнітного методів при ферозондовій дефектоскопії великогабаритних деталей // Автореферат канд. дис. – Івано-Франківськ, 2008. – 20 с.
4. Губський С. А. Контроль напруженого состояния сталей по коэрцитивной силе / С. А. Губский, В. И. Сухомлин, В. И. Волох – Машинобудування, 2014. – №13. – С. 6-10.
5. Габльовська Н. Я. Система контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих металічних конструкціях // Автореферат канд. дис. – Івано-Франківськ, 2008. – 20 с.
6. Власов, В.Т. Физическая теория процесса деформация-разрушение. Часть 1. Физические критерии предельных состояний металла / В.Т. Власов, А.А. Дубов. –М.: Изд-во ЗАО «ТИССО», 2007. –517 с.
7. Марченко Д. М. Визначення переддефектного стану металокопункцій об'єктів підвищеної небезпеки / Д. М. Марченко, М. Ф. Смирний, Г. О. Бойко, А. Б. Жидков. – Сєверодонецьк: Вид-во СНУ ім. В.Далія, 2016. – 268 с.

#### References

1. Patent Ukrainy #103155, G01R 33/02, opubl. 10.12.2015, bjul. #23. Dyferencijnyj ferozond / Smyrnyj M.F., Marčenko D.M., Šapran Je.M., Bojko H.O. ta in.
2. Patent Ukrainy # 59259 G01N 27/90, opubl. 15.03.2001, bjul. # 2. Proxidnyj elektromahnitnyj peretvorjuvač dlja kontrolju stalevyx kanativ / Berežyns'kyj V.I., Brjuxanov O.M., Sofijev V.M. ta in.
3. Švec' S. M. Pojednannja elektromahnitnoho i mahnitnoho metodiv pry ferozondovij defektoskopiji velykohabarytnyx detalej // Avtoreferat kand. dys. – Ivano-Frankivs'k, 2008. – 20 s.
4. Hubs'kyj S. A. Kontrol' naprjažennoho sostojannya stalej po koercytyvnoj syle / S. A. Hubs'kyj, V. Y. Suxomlyn, V. Y. Volox – Mašynobuduvannja, 2014. – #13. – S. 6-10.
5. Hahl'ovs'ka N. Ja. Systema kontrolju rozvytku mikrotriščyn u napruženo-deformovanyx metaličnyx konstrukcijax // Avtoreferat kand. dys. – Ivano-Frankivs'k, 2008. – 20 s.
6. Vlasov, V.T. The physical theory of the deformation-destruction process. Part 1. Physical criteria of metal limit states / V.T. Vlasov, A.A. Oaks. -M.: Publishing house of JSC "TISSO", 2007. -517 p.7. Marčenko D. M. Vyznačennja pereddefektnoho stanu metalokonstrukcij objektiv pidvyščenoji nebezpeky / D. M. Marčenko, M. F. Smyrnyj, H. O. Bojko, A. B. Žydkov. – Sjevjerodonec'k: Vyd-vo SNU im. V.Dalja, 2016. – 268 s.

#### DEVICE FOR MAGNETIC DIAGNOSIS OF FATIGUE FIXED DAMAGES OF METAL CONSTRUCTIONS

The article describes the principles of construction of the device for magnetic diagnostics of fatigue damage of metal structures. The justification of the connection between residual magnetization and plastic deformation of metal sections in the zone of the origin of the fatigue crack is given. The general scheme of the device and test results of the method, which is based on the use of residual magnetization of metal on steel samples, is presented.

**Keywords:** plastic deformation, degree of accumulation of fatigue damage, stress concentration, magnetometry, residual magnetization

#### Інформація про авторів.

Жидков Андрій Борисович – доцент кафедри електричної інженерії СНУ ім. В. Далія, к.т.н., доц.