

УДК 656.259.21

ВИЯВЛЕННЯ ПОПЕРЕЧНОЇ ТРІЩИНИ В ГОЛОВЦІ РЕЙКИ ЗА ДОПОМОГОЮ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕНЬ ТА НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Л. В. ВАЩИШИН¹, В. О. НІЧОГА²

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Національний університет "Львівська політехніка"

Побудовано штучну нейронну мережу (ШНМ), за якою, використовуючи коефіцієнти неперервного вейвлет-перетворення (НВП), вдається автоматично виявляти сигнали від поперечної тріщини рейки в дефектограмах, записаних магнетним вагоном-дефектоскопом. За вдало підібраної материнської вейвлет-функції НВП та конфігурації ШНМ можна виявляти сигнали від дефектів на початкових стадіях їх зародження, тобто коли сигнал сумірний зі шумом.

Ключові слова: дефект, поперечна тріщина, неперервне вейвлет-перетворення, штучна нейронна мережа.

Дуже важливо для надійності залізничних перевезень своєчасно виявити небезпечні дефекти рейок, які можуть призвести до аварійних ситуацій зі значними матеріальними витратами та людськими жертвами. Сьогодні для цього використовують ультразвукові та магнетні вагони-дефектоскопи, кожен з яких має як переваги, так і недоліки. Зокрема, магнетні краще виявляють поперечну тріщину в головці рейки [1], яка особливо небезпечна, оскільки може спричинити її злам під рухомим поїздом [2].

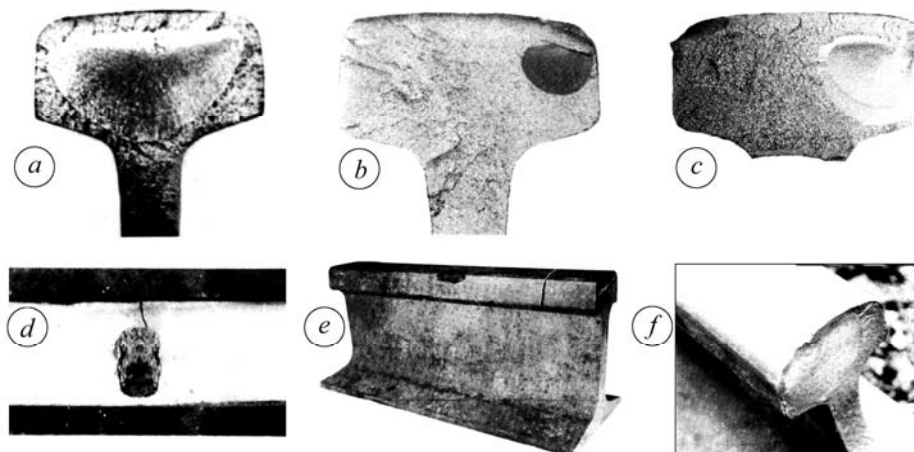


Рис. 1. Дефекти типу 20.2 (a), 21.2 (b, c), 24.2 (d), 25.2 (e), 27.2 (f).

Fig. 1. Defect types: 20.2 (a), 21.2 (b, c), 24.2 (d), 25.2 (e), 27.2 (f).

Магнетні вагони-дефектоскопи виявляють [3] такі різновиди поперечної тріщини, які класифікують як дефекти типу 20.2 (рис. 1a) у вигляді світлих або темних плям і злами, викликані внутрішніми вадами (флокенами, газовими бульбашками); типу 21.2 (рис. 1b, c) – у вигляді світлих або темних плям і злами внаслідок

недостатньої контактної-втомлювальної міцності металу; типу 24.2 (рис. 1d), спричинені буксуванням, юзом, проходом коліс з повзунами та вибоїнами; типу 25.2 (рис. 1e) – внаслідок ударів по рейці (інструментом, рейкою об рейку) та інших механічних пошкоджень; типу 27.2 (рис. 1f) – гартувальні тріщини в загартованому шарі металу головки та злами, викликані ними.

Основним джерелом інформації про стан рейок є сигнал від регулярних та нерегулярних елементів залізничного шляху, записаний під час неруйнівного контролю ділянки колії (дефектограма). Під час візуального огляду дефектограми, який поки що залишається єдиним порівняно надійним засобом виявлення дефектів, оператор магнетного вагона-дефектоскопа може пропустити дефект або неправильно його класифікувати. Саме тому автоматизація пошуку та розпізнавання форми сигналів (образів) від дефектів – основне завдання дефектоскопії залізничних рейок, що вимагає залучення сучасних засобів цифрової обробки сигналів (ЦОС), щоб допомогти оператору прийняти правильне рішення.

Методи досліджень. Щоб визначитись з методами дослідження та аналізу дефектоскопічних сигналів, необхідно виділити основні характеристики образу шуканого дефекту. Дефекту у вигляді поперечної тріщини відповідає кілька різновидів форми сигналу, які відтворюють етапи його розвитку [4] (рис. 2).

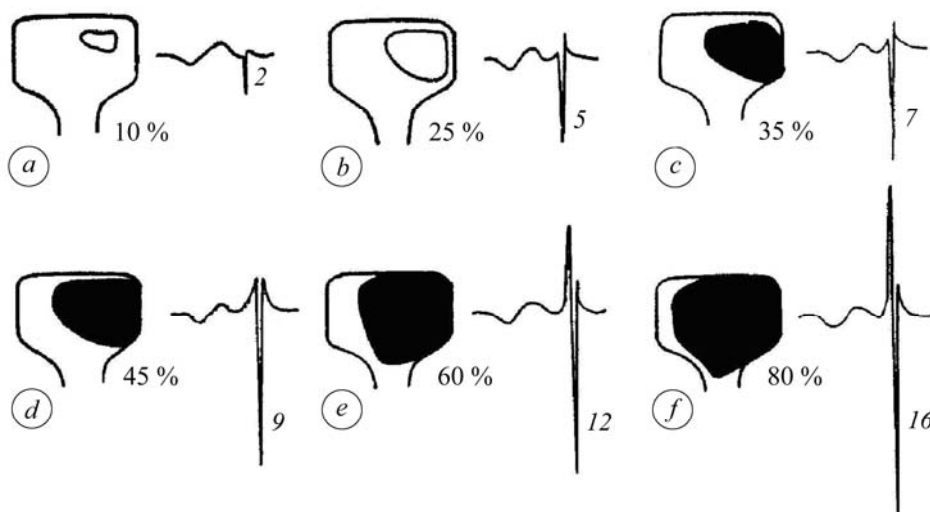


Рис. 2. Типові форми сигналу від дефекту за кодом 21 [4]: чорним кольором виділено дефекти, що виходять на поверхню; цифри – відсоткове відношення площі дефекту до площі поперечного перерізу головки рейки та амплітуди глобального від’ємного імпульсу сигналу до амплітуди сигналів від шпальних підкладок (a_n).

Fig. 2. Typical waveforms of a defect by code 21 [4]: defects coming to the surface are marked by the black color; digits – the percentage of the defect area to the cross-sectional area of the rail head and the amplitude of global negative pulse of a signal to the amplitude of substrate signals (a_n).

Однією з найхарактерніших особливостей таких сигналів є чітко виражена асиметрія: амплітуда від’ємної частини сигналу зазвичай у 3–4 рази перевищує максимальну додатну. Інша важлива їх особливість в тому, що амплітуда правої частини сигналу завжди більша, або, в граничному випадку, рівна амплітуді лівої. Винятком є сигнали від сильно розвинутих дефектів з виходом на поверхню (рис. 2e, f).

Підсумовуючи, можна зробити висновок, що тут найбільш пристосованим засобом ЦОС є неперервне вейвлет-перетворення (НВП) [5, 6], для якого необхідна функція $\psi(t)$ з нульовим значенням інтеграла

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0. \quad (1)$$

Цю функцію отримують на основі базової (материнської) $\psi_0(t)$, що визначає тип вейвлету. Базова вейвлет-функція повинна забезпечувати виконання двох основних операцій: зміщення по осі часу – $\psi_0(t-b)$, якщо $b \in R$; масштабування – $a^{-1/2} \cdot \psi_0(t/a)$, якщо $a > 0$ та $a \in R^+ - \{0\}$. Параметр a задає ширину цього пакета, а b – його зміщення. Запишемо вираз, який відразу задає дві властивості функції $\psi(t)$:

$$\psi(t) = a^{-1/2} \cdot \psi_0\left(\frac{t-b}{a}\right). \quad (2)$$

Отже, для заданих a та b функція $\psi(t)$ є вейвлетом.

Результатом НВП сигналу є обчислення вейвлет-коефіцієнтів

$$C(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot a^{-1/2} \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (3)$$

які визначають інтегральний скалярний добуток сигналу $s(t)$ на вейвлет-функцію заданого виду.

Основні критерії виявлення сигналів від дефектів залізничних рейок за допомогою НВП [7]:

1. Материнська функція НВП повинна бути максимально подібна до образу сигналу, який необхідно виявити.

2. Потрібно вибрати такі масштаби НВП (для поперечної тріщини пропонують у межах від 8 до 21 масштабів), за якими з найбільшою вірогідністю можна стверджувати про присутність сигналу від дефекту. Пріоритет треба віддавати меншим масштабам (високі частоти), оскільки це впливає на точність виявлення дефекту (що менший масштаб, то більша роздільна здатність за часом і, навпаки).

3. Слід оптимально підібрати пороги для вейвлет-коефіцієнтів за кожним з вибраних масштабів. Відповідно до цих порогів приймають рішення про наявність сигналу від дефекту чи його відсутність. Цей критерій відкриває можливість залучення до процесу виявлення дефектів ще один засіб ЦОС – штучну нейронну мережу (ШНМ) [8, 9].

Результати та їх обговорення. За поданими критеріями побудували ШНМ для автоматичного виявлення сигналів від поперечної тріщини (рис. 3), яка сформована з вхідного, прихованого та вихідного шарів.

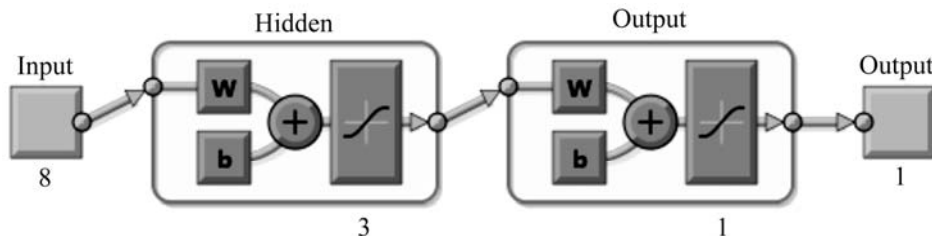


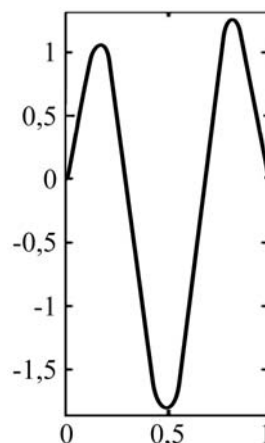
Рис. 3. Штучна нейронна мережа для автоматичного виявлення сигналів від поперечної тріщини рейки: цифри – кількість вузлів у вхідному, прихованому та вихідному шарах, відповідно.

Fig. 3. Artificial neural network for automatic detection of signals from the transverse crack in the rail: numbers are the amount of knots in the input, hidden and outgoing layers, respectively.

Вхідний шар містить вісім входів, на які подають вейвлет-коефіцієнти НВП дефектоскопічного сигналу (8–15 масштаби). Як материнську вейвлет-функцію для НВП обрали вейвлет [10], адаптований до виявлення сигналів від поперечної тріщини (рис. 4).

Рис. 4. Вейвлет, адаптований до виявлення сигналів від поперечної тріщини в головці рейки.

Fig. 4. Wavelet adapted to detection of signals from the transverse crack in the rail head.



Вхідні сигнали дублюються і надходять на кожен з трьох вузлів прихованого шару (рис. 3), де їх перемножують на вагові коефіцієнти W (встановлюють під час навчання), додають і, враховуючи вузол зміщення b , цю суму подають на передавальну функцію. Далі сигнали з цих вузлів надходять у вихідний шар і, залежно від подібності до сигналу від поперечної тріщини рейки, мережа формує 1 або 0 (наявність чи відсутність дефекту).

Для навчання нейронної мережі використали коефіцієнти НВП (на масштабах від 8 до 15) для 50 сигналів від поперечної тріщини рейки (еталонні значення) та 50 від шпальних підкладок (хибні значення). Процес навчання можна охарактеризувати за залежністю середньоквадратичної похибки мережі від епохи навчання (рис. 5) для трьох вибірок (у межах навчальної послідовності): навчальної (70%), яка регулює вагові коефіцієнти; узагальнювальної (15%), що перевіряє відповідні властивості мережі та зупиняє навчання, та тестової (15%) для абсолютно незалежного тестування мережі. У результаті аналізу дефектоскопічного сигналу, записаного на ділянці колії Львів–Сянки–Чоп 6 листопада 2009 р., за допомогою мережі виявили десятки “підозрілих” фрагментів, які за формою нагадували сигнал від поперечної тріщини (рис. 6).

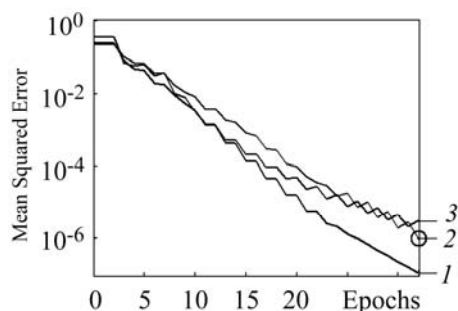


Рис. 5. Fig. 5.

Рис. 5. Залежність середньоквадратичної похибки нейронної мережі від епохи навчання для навчальної (1), узагальнювальної (2) та тестової (3) вибірок.

Fig. 5. Dependence of the mean squared error of the neural network on training epoch for training (1), validation (2) and testing (3) data sets.

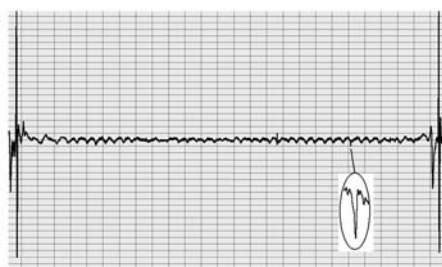


Рис. 6. Fig. 6.

Рис. 6. Сигнал, який виявила нейронна мережа на дефектограмі, записаній під час заїзду Львів–Сянки–Чоп.

Fig. 6. The signal detected in the defectogram received during checking of the railway Lviv–Syanky–Chop by the neural network.

Встановили, що амплітуда виявленого сигналу сумірна з амплітудою сигналів від підкладок, що свідчить про можливість пошуку сигналів від слабозвинутих дефектів, а також спостерігати їх розвиток. Звичайно серед сигналів, які

виділила мережа, є і хибні, але, незважаючи на це, ШНМ залишається одним із найпотужніших засобів розпізнавання дефектів. Вона не приймає і не повинна приймати рішення про придатність рейки до подальшої експлуатації. Не може замінити оператора вагона-дефектоскопа в цій відповідальній справі, але може значно полегшити і поліпшити його роботу.

ВИСНОВКИ

Досліджено можливість автоматизації процесу виявлення дефектів залізничних рейок за допомогою ШНМ. Як вхідні параметри мережі запропоновано використовувати вейвлет-коефіцієнти НВП дефектоскопічного сигналу. За вдалого вибору материнської вейвлет-функції НВП та правильної конфігурації ШНМ можна виявити дефекти на ранніх стадіях розвитку.

РЕЗЮМЕ. Построена искусственная нейронная сеть (ИНС), которая на основе коэффициентов непрерывного вейвлет-преобразования (НВП) позволяет автоматически обнаруживать сигналы от поперечной трещины рельса на дефектограммах, записанных магнитным вагоном-дефектоскопом. При удачно подобранной материнской вейвлет-функции НВП и конфигурации ИНС можно выявлять сигналы от дефектов на начальных стадиях их зарождения, т. е. когда сигнал сопоставим с шумом.

SUMMARY. The artificial neural network (ANN) for automatic detection of signals from transverse cracks (in defectograms recorded by magnetic wagon-defectoscope) which is based on the coefficients of continuous wavelet transform (CWT) is constructed. In case the mother wavelet of CWT and configuration of ANN are well matched the network allows to detect signals from defects in the early stages of their initiation, i. e. when the signal is comparable with the noise.

1. Нічога В. О. Моделювання збурення магнітного поля залізничної рейки навколо поперечної тріщини // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – 45, № 3. – С. 96–105.
(Nichoha V. O. Modeling of disturbances of the magnetic field of a rail around a transverse crack // Materials Science. – 2009. – 45, № 3. – P. 431–440.)
2. Особливості виявлення дефектів рейок в умовах Львівської залізниці / В. О. Нічога, М. В. Сім'яновський, І. С. Кучма, Г. Р. Трохим // Відбір і обробка інформації. – 2011. – Вип. 34 (110). – С. 42–48.
3. Класифікація і каталог дефектів і пошкоджень елементів стрілочних переводів та рейок залізниць України / Е. Даниленко, А. Орловський, А. Татуревич та ін. – Дніпропетровськ: Арт-Пресс, 2000. – 148 с.
4. Королев М. Ю. Магнитодинамический метод контроля рельсов. Методология расчета полей и сигналов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Спб., 2003. – 26 с.
5. Sifuzzaman M., Islam M. R., and Ali M. Z. Application of wavelet transform and its advantages compared to Fourier transform // J. of Physical Sci. – 2009. – 13. – P. 121–134.
6. Застосування віконного перетворення Фур'є і вейвлет-перетворення при аналізі сигналів магнітної діагностики залізничних рейок / В. О. Нічога, Л. В. Ващишин, І. В. Сторож, В. М. Іванчук // Матеріали 16-ої Міжнар. наук.-техн. конф. “Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів” (ЛЕОТЕСТ-2011), 21–26 лютого 2011 р. – Славське Львівської обл., 2011. – С. 134–139.
7. Ващишин Л. В., Нічога В. О. Критерії виявлення сигналу від поперечної тріщини рейки за допомогою неперервного вейвлет-перетворення // Відбір і обробка інформації. – 2013. – Вип. 38 (114). – С. 69–74.
8. Ващишин Л., Нічога В., Сторож І. Штучні нейронні мережі як засіб для розпізнавання дефектів залізничних рейок // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2012. – № 5. – С. 34–37.
9. Piotr Nazarko. Ocena stanu konstrukcji – Detekcja uszkodzen z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych. – Rzeszow, 2009. – 150 s.
10. Нічога В. О., Ващишин Л. В., Сторож І. В. Створення “материнської” вейвлет-функції та аналіз за її допомогою дефектоскопічного сигналу від поперечної тріщини рейок // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2012. – № 3. – С. 61–69.

Одержано 09.12.2013

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРІВ

Міжнародний двомісячний журнал “Фізико-хімічна механіка матеріалів”, який перевидає англійською мовою видавництво Springer Verlag під назвою “Materials Science”, друкує результати досліджень та оглядові праці у галузі міцності та довговічності конструкційних матеріалів, охоплюючи механіку руйнування, зокрема з урахуванням робочих умов, та суміжні ділянки матеріалознавства, фізики і хімії. Окремі рубрики присвячені зміцнювальним технологіям, методам захисту від корозії (інгібітори, покриття тощо), інженерії поверхонь і оптимізації структури, а також діагностиці та неруйнівному контролю елементів конструкцій.

Журнал публікує статті українською, російською та англійською мовами.

Вимоги до оформлення статті

1. Назву статті (**не більше двох рядків**) слід подати трьома мовами.
2. Обсяг статей (крім оглядових) разом з таблицями, рисунками та підписами до них і списком літератури не повинен перевищувати 12 тис. знаків (6 сторінок) шрифтом Times New Roman 10,5п з полуторним інтервалом.

3. Стаття повинна містити **ключові слова**, стислий виклад стану проблеми, опис предмета, мети і методу досліджень, результати та їх обговорення, висновки, за винятком коротких повідомлень обсягом не більше трьох сторінок.

4. **Резюме англійською, українською та російською мовами** до 20 рядків повинні містити **конкретні результати** і починатися словами “отримано...”, “показано...”.

5. На рисунках не повинно бути словесних позначень. У тексті статті вказують місце рисунка. Підписи пишуть мовою оригіналу та англійською. Англійський підпис мусить повністю пояснити, що зображено на рисунку. Рисунки, по змозі, роблять однакових розмірів, а їх ширина не має перевищувати 6 см. Подібні рисунки об’єднують у групи (Рис. *Ха*, *б*, *с*, ...). Рисунки, які у статті не аналізують і не використовують для наукових висновків, не поміщати. Не можна дублювати ті самі дані в таблицях, графіках і тексті статті, а також підписи під рисунками у тексті.

6. Для позначення величин вживати літери тільки латинської та грецької абеток. Всі символи треба пояснити в тексті. Не застосовувати індекси у вигляді початкових літер якогось слова, а замінити їх на цифри (наприклад, a_0 замість $a_{\text{поч.}}$). Номер формули вказують, якщо **на ній далі є посилання**.

7. Фізичні величини подають в одиницях СІ, користуючись міжнародними позначеннями.

8. Цитовану літературу треба обмежити тільки найважливішими працями. Список літератури подають у порядку посилання в статті **мовою оригіналу** (можна дублювати англійською мовою), як указано нижче.

Мазурак Л. П., Бережницький Л. Т., Качур П. С. Пружна рівновага ізотропних тіл із криволінійними включеннями // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1998. – № 6. – С. 21–31.

Ang H. E. and Gao Y. L. Strength prediction of unidirectional composites with a circular hole // Int. J. of Fracture. – 1992. – **56**, № 2. – Р. 23–29. (*Для журнальних статей*).

Кортен Х. Т. Механіка розрушення композитов // Разрушение / Под ред. Г. Либовица. – М.: Мир, 1976. – Т. 5. – С. 367–471.

Speidel H. J. C., Uggowitzer P. J. and Speidel M. O. Properties of cold worked high-nitrogen chromium based alloys // 5th Int. Conf. on High Nitrogen Steels (Espoo, Finland, May, 24–26, 1998). – Stockholm, Sweden, 1998. – Р. 124. (*Для статей у збірнику*).

Похмурський В. І., Федоров В. В. Вплив водню на дифузійні процеси в металах. – Львів: Вид. ФМІ НАН України, 1998. – 208 с. (*Для монографій*).

9. Обсяг огляду та літературу до нього можна збільшити залежно від тематики та інформативності.

Разом із двома видруками в редакцію подають коп’ютерну версію статті, підготовлену в редакторі Word for Windows 2003 або XP, та рисунки у форматах *.tif або *.cdr (лише в чорно-білому виконанні). Статтю передають на CD диску або Е-поштою: pctmm@ipm.lviv.ua (надсилати як attachment).

10. До статей додають дані про авторів (ПІБ повністю (трьома мовами), адресу, № телефону, Е-пошту), а також назву й адресу установи, в якій виконано роботу, і вказують контактну особу.

**Статті, не оформлені за цими правилами, редакція не розглядатиме.
Докладнішу інформацію можна отримати телефоном: (032) 263-73-74.**

E-mail: pctmm@ipm.lviv.ua

INSTRUCTIONS TO CONTRIBUTORS

International bimonthly Journal “Fizyko-Khimichna Mekhanika Materialiv” (“Physicochemical Mechanics of Materials”) is published also in English by Springer Verlag Publishing House under the title “Materials Science”. The Journal enlightens investigation results and provides reviews on problems of strength and durability of structural materials including fracture mechanics, in particular with account of service conditions and also allied fields of materials science, physics and chemistry. Special sections are devoted to strengthening technologies, corrosion-protection methods (inhibitors, coatings etc.), surface engineering and optimization of structure as well as diagnostics and nondestructive testing of structural elements.

Papers are published in Ukrainian, Russian, and English.

Manuscript Requirements

1. Title of the paper (**no longer than two lines**) should be given in the original language and in English.

2. Manuscripts (with the exception of reviews) including tables, figures and figure captions and a list of references should not exceed 12 000 characters (approximately 6 pages typed in Times New Roman 10,5 p).

3. Manuscript should contain **key words**, a brief presentation of the problem, description of subject, object and method of investigation, results and their discussion, conclusions, with the exception of brief reports up to three pages.

4. **Summary in English** of not more than 20 lines should contain **concrete results** and begin with the words “...obtained...”, “...demonstrated”.

5. Figures should not bear any verbal notes. Figures place should be indicated in the text. Figure captions should be in the original language and in English. The captions in English should completely explain to the reader what is illustrated in the Figure. Figures sizes, if possible, should be equal, with the width not exceeding 6 cm. Similar figures should be united in groups (Fig. *Xa, b, c, ...*). Figures that are not analyzed in the text and are not used in scientific conclusions should not be placed in the text. The same data should not be repeated in tables, graphs, manuscript text, and in figure captions.

6. For designations only Latin and Greek letters should be used. All symbols should be explained in the text. One should use digits for indices and not first letters of a word (e.g. use a_0 instead of a_{start}). Formula number is written in case it is **further mentioned** in the text.

7. SI units should be used throughout the manuscript.

8. Only the most important references should be given. References should be given in the order of quoting in the manuscript in the **original language** (only duplication in English is acceptable), as shown below:

Turnbull A. Factor affecting the reliability of hydrogen permeation measurement / Material Science Forum. – 1995. – **192–194**. – P. 63–69.

Ang H. E. and Gao Y. L. Strength prediction of unidirectional composites with a circular hole // Int. J. of Fracture. – 1992. – **56**, № 2. – P. 23–29. (**For papers in the journal**).

Krasowsky A. Y., Dolgiy A. A., and Torop V. M. Charpy testing to estimate pipeline steel degradation after 30 years of operation / Eds. D. Francois, A. Pineau // Proc. of the Charpy Centenary Conference, Poitiers. – 2001. – Vol. **1**. – P. 489–495.

Speidel H. J. C., Uggowitzer P. J. and Speidel M. O. Properties of cold worked high-nitrogen chromium based alloys // 5th Int. Conf. on High Nitrogen Steels (Espoo, Finland, May, 24–26, 1998). – Stockholm, Sweden, 1998. – P. 124. (**For a paper in a collection of papers**).

Bernstein I. M. and Pressouyre G. M. The role of traps in the microstructural control of hydrogen embrittlement of steels / Eds. R. A. Oriani, J. P. Hirth, and M. Smialowski // Hydrogen Degradation of Ferrous Alloys. – Park Ridge: Noyes Publ., 1985. – P. 641–685. (**For a book**)

9. The text of the review and references to it can be extended depending on the subject and information submitted.

Two copies of the manuscript and obligatory text file (Word for Windows 2003 or XP and files of figures (*.tif or *.cdr) (only black-white preparation) should be submitted to the Editorial Board on CD disk or by E-mail: pcmm@ipm.lviv.ua (as attachment).

10. The data concerning the author(s) (names, home and office address, telephone, E-mail) and also the institution and its address should be added to the manuscript, and also corresponding author.

Manuscripts not prepared according to the Contributors' instructions will be rejected.

To get more detailed information please contact: + 380 (32) 263-73-74.