

УДК 620.192

## МЕТОДИКА ВИБОРУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З ФАЗОВАНИМИ РЕШІТКАМИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРІВ ТА ФОРМИ ДЕФЕКТІВ

О. В. ПОПОВИЧ, О. М. КАРПАШ, М. О. КАРПАШ

*Національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ*

Запропоновано технологію ультразвукових фазованих решіток для неруйнівного контролю металоконструкцій, що дасть можливість точніше визначити розміри та тип дефекту. Досліджено вплив зміни параметрів фазованих решіток на напрямок звукового поля перетворювача. Запропоновано числовий метод розрахунку часових затримок між елементами решітки, що дає можливість спрямувати та сфокусувати ультразвуковий промінь на задану глибину та певний кут поширення.

**Ключові слова:** *ультразвукові фазовані решітки, параметри перетворювача, спрямованість звукового поля, часові затримки, неруйнівний контроль, дефектометрія.*

Щоб забезпечити детальний контроль різноманітних об'єктів та виявити в них специфічні експлуатаційні дефекти, важливо вибрати та застосувати правильну методику. У сучасній світовій та вітчизняній практиці неруйнівного контролю (НК) виробів з металів найпоширеніший ультразвуковий метод. Під час ультразвукового контролю (УЗК) небезпечних виробничих об'єктів важливо не тільки виявити ймовірний дефект і визначити його розміри, а й встановити його форму і орієнтацію. Саме сукупність цієї інформації є головною для прийняття рішення оператором (технічним експертом) про бракування.

Реальні дефекти можуть мати різноманітні форму, орієнтацію та акустичні властивості. Під час звичайного УЗК інформацію про дефект одержують за появою на екрані дефектоскопа сигналу певної амплітуди. Але визначити його форму складно, оскільки дефекти різних розміру і конфігурації можуть давати однаковий за амплітудою відгук (рис. 1). До того ж один і той самий дефект за "прозвучування" під різними кутами матиме абсолютно різне відбите поле. Найнебезпечніші тут тріщини [1], нахил, форма та розмір яких різноманітні. У моделях тріщин (пропилування і зарубка) амплітуда сигналу суттєво залежить від відносної висоти дефекту  $h$  (рис. 2) і, звичайно, довжини відбивача. Загалом для реальних дефектів така залежність відсутня, тому точно знайти всі параметри складно.

Згідно з принципом Гюйгенса [2] кожна точка перешкоди на шляху ультразвукової хвилі стає вторинним джерелом інтерференційних хвиль. Тому індикаторна розсіювання (ІР) від дефекту – результат складних хвильових процесів. Її структуру та форму визначають розміри, конфігурація, шорсткість поверхні дефекту та його орієнтація, кут падіння променя, параметри перетворювача та методика контролю.

Тому необхідно вибрати технологію, за якою вдасться оцінити дійсні параметри виявленого дефекту, його розміри та тип без складних обчислень та аналізу результатів. Варто зауважити, що на практиці часто доступ до об'єкта контролю, час перевірки та контроль об'єктів складної геометричної форми обмежені.

Тут придатна технологія ультразвукових фазованих решіток, яка стає все привабливішим методом ультразвукової візуалізації, що досить активно та успішно використовують у медицині [3, 4]. Порівняно зі звичними одноелементними пере-

творювач з фазованими решітками (ПФР) забезпечує швидке управління променем для контролю великих ділянок без механічного переміщення приладу, що є одним із недоліків сучасної ультразвукової діагностики через необхідність забезпечити належний контакт та подальшу обробку результатів вимірювань.

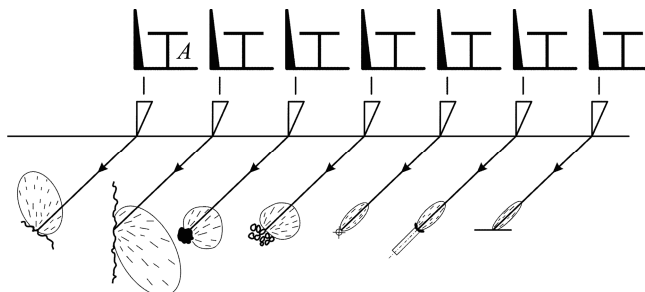


Рис. 1. Рівносигнальні відбивачі – дефекти різних розміру та форми з однаковою еквівалентною площею.

Fig. 1. Equal-signal reflectors – defects of various sizes and shapes with the same equivalent area.

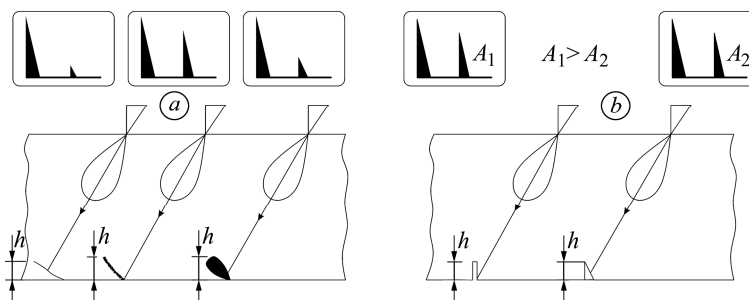


Рис. 2. Відбиття поверхневих дефектів: *a* – реальних; *b* – пропилювань і зарубок.

Fig. 2. Surface defects reflection: *a* – real; *b* – cutting and notch.

Завдяки невпинному розвитку електроніки вартість ПФР суттєво знижується, тому перехід на інформативнішу та швидкісну методику НК все реальніший. Ще одна їх перевага – контроль об'єктів складної геометричної форми [5]. Багато дослідників сьогодні працюють над поетапним переходом на технологію ФР у різних галузях, включаючи дефектометрію матеріалів і конструкцій [6–8].

Щоб повніше використовувати можливості ПФР, важливо вибрати його параметри, які забезпечать необхідне фокусування. Слід враховувати особливості поширення хвиль зі зміною цих параметрів, зокрема кількість елементів, відстань між ними, розмір елемента, частоту, значення апертури, властивості матеріалу основи тощо. Моделюючи механізм і послідовність контролю за допомогою ПФР (сканування), можна оцінити напрям поширення ультразвукових коливань у досліджувану поверхню та визначити глибину фокусування. На сьогодні остаточно не встановлено вплив кожного з параметрів на функціонування перетворювача. Тому таке дослідження надзвичайно важливе та актуальне.

ПФР складається з кількох (16; 24; 32; 64) п'єзоелектричних елементів, кожен з яких пульсує з відповідними часовими затримками, щоб у подальшому сформувати та сфокусувати акустичні хвильові фронти. Найпоширеніші лінійні масиви з 32÷128 елементами, які можуть бути мультиплексовані та/або електронно-керовані і орієнтовані за допомогою блока електронного управління [9]. Базовими параметрами ПФР є частота ( $f$ ), ширина елемента ( $a$ ), відстань між елементами ( $b$ ).

тами ( $d$ ), їх кількість ( $N$ ) та апертура ( $D$ ) (рис. 3). Проаналізуємо поширення ультразвукових коливань на певну глибину та кут.

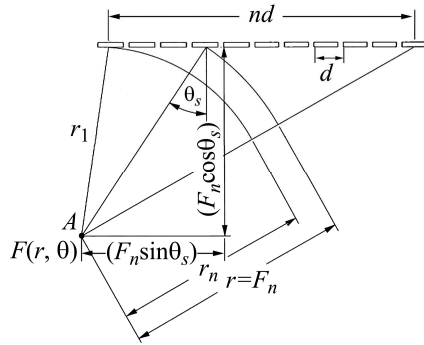


Рис. 3. Модель фокусування ультразвукових коливань ПФР:  $A$  – точка фокусування.

Fig. 3. Focusing model of phased array transducer beams:  $A$  – focus point.

Основними просторово-часовими величинами, що характеризують звукове поле акустичного променя, є звуковий тиск, коливальні швидкість та зміщення частинок [10]. Оскільки інформативним параметром чутливого елемента технічного засобу для реєстрації ультразвукових коливань є звуковий тиск, оцінимо модель його розподілу.

Відстань  $r$  від  $n$ -го елемента ПФР до точки фокусування  $F_n$  (рис. 3) виразимо у вигляді простого тригонометричного рівняння:

$$F_n = \sqrt{r_1^2 + [(n-1)d]^2 - 2r_n(n-1)d \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)},$$

де  $r_1, r_n$  – відстані від першого та  $n$ -го елементів до точки фокусування;  $\theta$  – кут

фокусування.

Звуковий тиск у кожній точці середовища

$$p(r, \theta, t) = \frac{p_0}{r} \frac{\sin\left(\frac{ka \sin \theta}{2}\right) \sin\left[\left(\frac{\omega \Delta \tau - kd \sin \theta}{2}\right) N\right]}{\frac{ka \sin \theta}{2} \sin\left(\frac{\omega \Delta \tau - kd \sin \theta}{2}\right)} \exp\left[-j\left(\frac{ka \sin \theta}{2}\right)\right] \times \exp\left[-j\left(\frac{\omega \Delta \tau - kd \sin \theta}{2}\right)(N-1)\right] \exp[j(\omega t - kr)], \quad (1)$$

де  $p_0$  – тиск на поверхні випромінювача;  $k$  – хвильове число;  $\omega$  – кутова частота;  $\Delta \tau$  – часова затримка між сусідніми елементами (для гомогенного ізотропного середовища),  $\Delta \tau = d \sin \theta / c$ ,  $c$  – швидкість поширення звуку в заданому середовищі.

**Спрямованість звукового поля.** Щоб визначити оптимальні умови для ефективного управління променем, потрібно проаналізувати його спрямованість. Для досягнення вищої роздільної здатності під час НК слід вибрати такі параметри ПФР, щоб звуковий тиск (1) у точці фокусування був максимальний, а в інших напрямках поширення – мінімальний [11]. Спрямованість променя або функцію направленості знаходять як акустичний тиск  $p(r, t, \theta)$  під будь-яким довільним кутом  $\theta$ , нормований за тиском  $p(r, t, \theta_s)$  під кутом фокусування  $\theta_s$ :

$$H(\theta) = \left| \frac{p(r, t, \theta)}{p(r, t, \theta_s)} \right|. \quad (2)$$

Зауважимо, що розв'язок виразу (2) повинен задовольняти умову  $0 < H(\theta) < 1$ , а значення функції на куті фокусування відповідати умові  $H(\theta_s) = 1$ . Підставивши значення звукового тиску, отримане в попередніх дослідженнях [11], спростивши їх, одержимо:

$$H(\theta) = \left| \frac{\sin\left(\frac{\pi a \sin \theta}{\lambda}\right) \sin\left[\frac{\pi d (\sin \theta_s - \sin \theta)}{\lambda} N\right]}{\frac{\pi a \sin \theta}{\lambda} N \sin\left[\frac{\pi d (\sin \theta_s - \sin \theta)}{\lambda}\right]} \right|.$$

Рис. 4 ілюструє спрямованість звукового поля, подану в полярних координатах, кута (від  $-90^\circ$  до  $90^\circ$ ) та функцію направленості (від 0 до 1,0), значення якої максимальне, якщо кут фокусування рівний  $0^\circ$ . Технологія ФР передбачає не тільки досягнення максимального тиску в точці фокусування, а й високої роздільної здатності, що визначається шириною основної вітки на діаграмі направленості. Що менша ширина основної вітки, то локалізованіше поширюється ультразвукова енергія, не розсіюючись у напрямках, відмінних від кута фокусування.

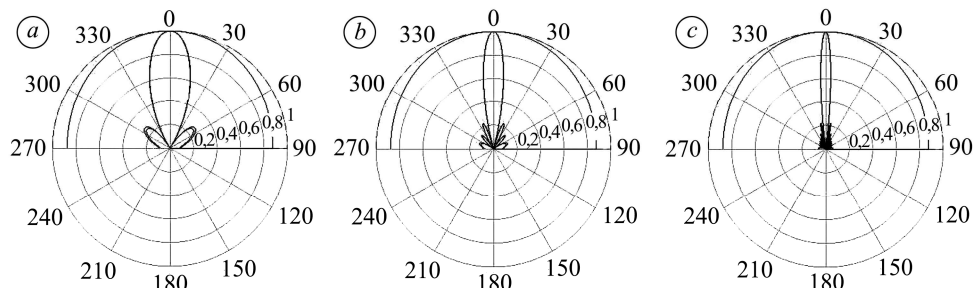


Рис. 4. Направленість звукового поля зі зміною кількості елементів:  $a - N = 4$ ;  $b - 8$ ;  $c - 16$ .

Fig. 4. Representation of sound field directivity at a change in the number of elements:  
 $a - N = 4$ ;  $b - 8$ ;  $c - 16$ .

Побудували (рис. 5) діаграми направленості ФР за однакових параметрів  $l_f = 50$  mm;  $a = 20^\circ$ ;  $d = 0,5\lambda$ ;  $B = 5,0$  і  $f = 5$  MHz, але різної кількості елементів  $N = 8$ ; 16; 32 та 64. Як бачимо, профіль ультразвукового променя стає тоншим зі збільшенням кількості елементів, у результаті чого підвищується точність фокусування. З'являються основна вітка направленості на куті фокусування і дві малі бічні. Бокові вітки спричинені взаємодією елементів ФР. За  $N = 8$  ширина основної пелюстки (суцільна лінія)  $18,5^\circ$ , що еквівалентно значенню амплітуди вище  $0,5$  ( $-6$  dB), і зменшується до  $9,3^\circ$  за  $N = 16$ , до  $4,6^\circ$  за  $N = 32$  та до  $2,1^\circ$  за  $N = 64$ . Зауважимо, що амплітуда основної пелюстки зростає пропорційно до зміни кількості елементів. Отже, зі збільшенням їх кількості фокусування пучка поступово посилюється.

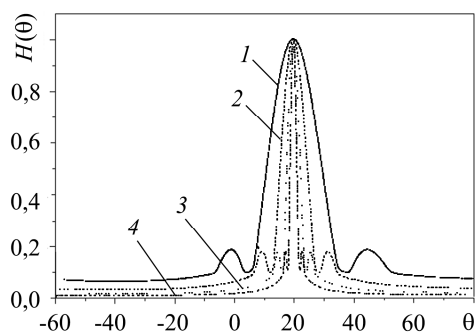


Рис. 5. Fig. 5.

Рис. 5. Спрямованість ультразвукового променя  $H$  залежно від кількості елементів  $N$ :  
 $1 - 8$ ;  $2 - 16$ ;  $3 - 32$ ;  $4 - 64$ .

Fig. 5. Ultrasonic beam directivity for different elements number:  $1 - 8$ ;  $2 - 16$ ;  $3 - 32$ ;  $4 - 64$ .

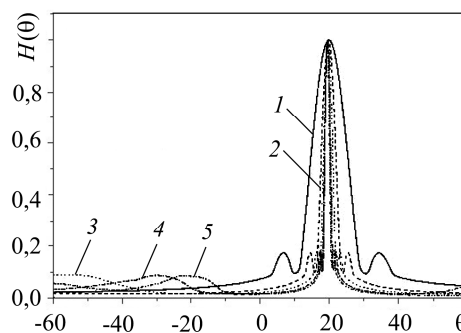


Рис. 6. Fig. 6.

Рис. 6. Вплив зміни відстані  $d$  між елементами ПФР на направленість ультразвукового променя:  $1 - d = 0,2\lambda$ ;  $2 - 0,5\lambda$ ;  $3 - 0,8\lambda$ ;  $4 - 1,2\lambda$ ;  $5 - 1,5\lambda$ .

Fig. 6. Influence center-to-center  $d$  spacing of elements on directivity function:  
 $1 - d = 0.2\lambda$ ;  $2 - 0.5\lambda$ ;  $3 - 0.8\lambda$ ;  $4 - 1.2\lambda$ ;  $5 - 1.5\lambda$ .

Іншим важливим чинником забезпечення необхідної точності ПФР є вибір відстані між елементами (рис. 6). Міжелементну відстань  $d$  вибирали в межах  $0,2 \dots 1,5 \lambda$  за сталих параметрів:  $N = 32$ ;  $r = 25 \text{ mm}$ ;  $\theta_s = 20^\circ$ ;  $f = 5 \text{ MHz}$ . З її збільшенням основна вітка діаграми направленості стає вужчою, бокові – ширшими і віддаляються від неї. Бокові пелюстки виникали, коли відстань між елементами  $d$  перевищувала половину довжини, поширюваної у випробуваному матеріалі ультразвукової хвилі [6]. Отже, спрямованість ультразвукового променя також можна підвищити, збільшуючи відстані між елементами так, щоб не виникало шкідливих дифракційних максимумів.

**Фокусування променя на задані кут та глибину.** Зміни фази досягають послідовною пульсацією решітки з часовою затримкою. Напрямок поширення акустичного пучка можна переорієнтувати на будь-який кут, міняючи послідовність синхронізації імпульсів збудження. Всі окремі хвильові фронти сумують, щоб отримати максимальну акустичну потужність уздовж потрібного напрямку.

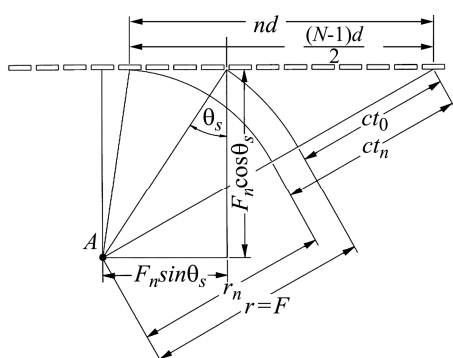


Рис. 7. Fig. 7.

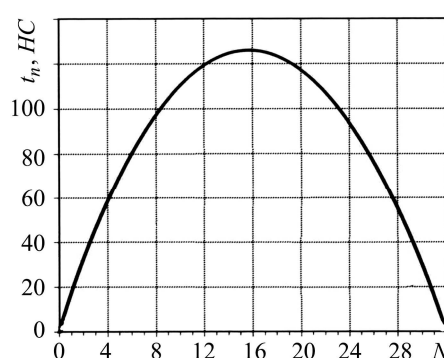


Рис. 8. Fig. 8.

Рис. 7. Геометрія лінійної ФР для розрахунку часових затримок:  $A$  – точка фокусування.

Fig. 7. Geometry of linear phased array used for time delay calculation:  $A$  – focus point.

Рис. 8. Часові затримки для сканування на глибині 15 mm для 32-елементної лінійної решітки.

Fig. 8. Time delays of 32-elements linear phased array for scanning at a depth 15 mm.

Фокусують ультразвуковий промінь, об'єднуючи сферичне та лінійне часові співвідношення. В результаті промінь, який поширюється під заданим кутом, генерується. Затримки фокусування розраховують за формулою

$$t_n = \frac{F_n}{c} \left\{ \left[ 1 + \left( \frac{Nd}{F_n} \right)^2 + \frac{2Nd}{F_n} \sin \theta_n \right]^{1/2} - \left[ 1 + \left( \frac{(n-N)d}{F_n} \right)^2 - \frac{2(n-N)d}{F_n} \sin \theta_n \right]^{1/2} \right\}, \quad (3)$$

де  $t_n$  – необхідна затримка для  $n$ -го елемента ( $n = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$ ), ns;  $F_n$  – фокусна відстань. Зауважимо (рис. 7), що перший елемент ( $n = 0$ ) відраховували з правого боку [6]. Ця узагальнена формула справедлива для будь-якої кількості елементів перетворювача (парні чи непарні), якщо значення кута фокусування знаходиться в проміжку  $0^\circ < \theta_s < 90^\circ$ . Результатом розрахунку формули (3) для 32-елементної решітки та фокусування на глибині 15 mm є графічна залежність часових затримок для кожного елемента ФР (рис. 8).

Вибір оптимальних ПФР забезпечує високу якість управління, пригнічення бічних віток діаграми направленості, досягнення максимальної амплітуди звукового тиску в напрямку фокусування, зменшення розміру мертвої зони перетворювача, збільшення прощі огляду і зменшення його розмірів та маси.

## ВИСНОВКИ

Описано числовий метод моделювання, за яким можна візуалізувати профіль променя та визначити звуковий тиск для різних параметрів перетворювача. Поліпшити спрямованість променя можна, збільшуючи кількість елементів, а отже, досягаючи вищої амплітуди звукового тиску в напрямку фокусування і меншого тиску бічних пелюсток, а ультразвукову його енергію спрямувати точніше, збільшуючи відстань між елементами. Однак існує верхня межа (або оптимальне значення), що забезпечує кращу його спрямованість без введення шкідливих дифракційних максимумів. Запропоновано методику фокусування УЗ променя лінійного ПФР, що полягає в розв'язанні рівняння, вхідними параметрами якого є фокусна віддаль та кут фокусування, швидкість поширення звуку в матеріалі, кількість елементів та відстань між ними. Задаючи ці величини, отримуємо час активації кожного елемента, що зумовить поширення променя в необхідну точку об'єму досліджуваного об'єкта. Після розрахунків вибрали перетворювач з максимальною частотою 5 MHz, кількістю елементів 16 та міжелементною відстанню 0,5 mm, який дасть можливість отримати інформацію про тип та розміри виявлених дефектів.

*РЕЗЮМЕ.* Предложена технология ультразвуковых фазированных решеток для неразрушающего контроля металлоконструкций, позволяющая более точно определить размеры и тип дефекта. Исследовано влияние изменения параметров таких решеток на направленность звукового поля преобразователя. Предложен численный метод расчета временных задержек между элементами решетки, что даст возможность направить и сфокусировать ультразвуковой луч на заданную глубину и на определенный угол распространения.

*SUMMARY.* Technology of ultrasound phased arrays for non-destructive testing of metal structures, which can more accurately determine the size and type of defect was proposed. The effect of phased arrays parameters changes to focus the sound field transmitter was conducted. A numerical method for calculating the time delays between the elements of a phased array that allows directing and focusing the ultrasonic beam to a predetermined depth and a certain angle spread was proposed.

1. *Smith S. W. and Trahey G. E.* Two-dimensional arrays for medical ultrasound // *Ultrasonic imaging*. – 1992. – № 14. – P. 213–233.
2. *Silk M. G.* Ultrasonic transducers for nondestructive testing. – Bristol: Hilger, 1984. – 176 p.
3. *Ramm von O. T. and Smith S. W.* Beam steering with linear arrays // *IEEE Trans. Biomed. Eng.* – 1983. – **BME-30**, № 8. – P. 438–452.
4. *An integrated multi-element array transducer for ultrasound imaging / J. V. Hatfield, N. R. Scales, A. D. Armitage, P. J. Hicks, Q. X. Chen, P. A. Payne // Sensors and Actuators A: Physical.* – 1994. – **41**, № 1–3. – P. 167–173.
5. *Попович О. В., Карнау М. О.* Аналіз акустичних методів ідентифікації та визначення параметрів дефектів металлоконструкцій // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. – 2014. – № 2(51). – С. 141–148.
6. *Junshan Gao and Ke Wang.* Study on the technology of ultrasonic imaging detection based on phased array // *Int. J. Signal Proc., Image Proc. and Pattern Recognition*. – 2013. – **8**, № 5. – P. 71–78.
7. *Sci-Chang Wooh and Lawrence Azar.* Phase steering and focusing behavior of ultrasound in cementitious materials // *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. – 1999. – **18**. – P. 2161–2168.
8. *Sampling phased array – a new technique for signal processing and ultrasonic imaging / A. Bulavinov, D. Joneit, M. Kröning, L. von Bernus, M. H. Dalichow, K. M. Reddy // Insight. – Nondestructive Testing and Condition Monitoring.* – 2008. – **50**, № 3. – P. 153–157.
9. *Разиграев А. Н.* Разработка оптимизированного преобразователя для ультразвукового контроля сварных соединений: Дис. канд. техн. наук. – М., 2009. – С. 104.
10. *Ермолов И. Н.* Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии: Краткий справ. – М.: Изд-во МГОУ, 2004. – 108 с.
11. *High-speed ultrasound volumetric imaging system – Part I: Transducer Design and Beam Steering / S. W. Smith, H. G. Pavy, S. G. Jr, and O. T. von Ramm // IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control.* – 1991. – **38**, № 2. – P. 100–108.

Одержано 24.06.2015

## 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 мовою оригіналу і англійською.  
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  $a_{поч.}$ ). Номер формули вказують, якщо **на неї 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 руйнування композитів // 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 // 5<sup>th</sup> 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 комп’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: [pcmm@ipm.lviv.ua](mailto:pcmm@ipm.lviv.ua) (надсилати як attachment).**

10. До статей додають дані про авторів (ПІБ повністю, 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.