

**АКУСТИКО-ЕМІСІЙНЕ ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРІВ
ГРАФІТОВОГО ВКЛЮЧЕННЯ, ЩО РУЙНУЄТЬСЯ**

Сформульовано теоретико-експериментальні засади визначення за сигналами акустичної емісії геометричних параметрів кулястого графітового включення, що руйнується у матриці високоміцного чавуна під дією квазістатичного навантаження. Проведено порівняння отриманих експериментальних даних з результатами металографічного аналізу. Показано, що метод акустичної емісії дозволяє ефективно виявити ранні стадії зародження руйнування у високоміцних чавунах, а отримані дані добре узгоджуються з результатами розрахунків, отриманих з аналітичних залежностей.

Актуальність проблеми. Для виготовлення окремих виробів і несучих елементів конструкцій у багатьох областях машинобудування застосовують чавуни, які мають оптимально вибрані фізико-механічні властивості. Добрі ливарні властивості та оброблюваність різанням, здатність гасити вібрації, низька чутливість до концентраторів напружень, висока корозійна стійкість і низька собівартість, високі статичні та динамічні міцнісні властивості дозволяють застосовувати чавуни для виготовлення різного типу деталей, елементів конструкцій і виробів [6, 25].

Однак у літературі відомі непоодинокі випадки руйнування елементів конструкцій і виробів із чавуну, які не досягли свого розрахункового терміну експлуатації. Таким чином, часті випадки спонтанного руйнування засвідчують важливість дослідження властивостей чавунів, зокрема, впливу структури на механізми їх руйнування і на міцнісні характеристики.

У чавунах концентраторами зародження і розвитку руйнування виступають графітові включення. Тому особливу зацікавленість становить дослідження стосовно раннього виявлення та оцінки кількісних ознак руйнування таких включень у різного роду матрицях чавунів.

Стан проблеми. Включення графіту в структурі чавуна в літературі прийнято розглядати як внутрішній дефект відповідних розмірів, форми та розміщення, що зумовлює схильність чавуну до крихкого руйнування [4–6]. Побудові математичних моделей тонких пружних включень у чавунах присвячено чимало праць [4, 10–12, 14]. Найзагальнішою математичною моделлю, що відображає деформацію тонкого пружного включення в суцільному середовищі, можна вважати співвідношення, встановлені у праці [12], де виходячи з тривимірної постановки задачі, описаний метод та одержані умови стрибка напружень і переміщень на тонкостінному пружному включенні. Як часткові випадки з них впливають умови ідеального контакту та умови на розрізі з вільними від напружень поверхнями, а також на абсолютно жорсткому включенні. За цим підходом можна одержати відповідні результати для неплоских і непружних включень. Проблемі наближеного розв'язування пружних задач для тіл з тонкими включеннями за допомогою модельного уявлення їх взаємодії з основним матеріалом присвячена низка праць [3, 4, 10, 18]. Розглядалися як двовимірні [3], так і тривимірні задачі [4], у яких з метою отримання простіших рівнянь досліджувались випадки відносно м'яких [10] і жорстких включень [4]. Встановлено характер асимптотики напружень поблизу тонкого жорсткого включення і пружного клиноподібного включення [9]. Відомі модельні співвідношення для тонкого пружного включення [12], які враховують всю інформацію про деформацію поверхонь включення і задовольняють диференціальні рівняння рівноваги. За їх допомогою побудовано інтегро-диференціальні рівняння відносно стрибків зміщень і напружень на поверхні включення під час дії на тіло силових і температурних факторів [20, 22]. Однак на основі цих

рівнянь поки що не отримано наближених замкнених або точних розв'язків задач про руйнування еліптичного чи еліпсоїдального включення у пластині чи у просторі за однорідного поля напружень.

Щодо просторових задач для тіл із жорстким включенням, то відомі дослідження осесиметричних та асиметричних задач для нескінченного тіла з дископодібними включеннями, а також для випадку еліптичного диска [15]. Найобґрунтованішим для отримання ефективних граничних умов, що визначають взаємодію включення з матрицею у випадку статичних задач теорії пружності, є асимптотичний підхід [5, 7, 13]. З точки зору експериментальних досліджень найефективнішими з них є ті, де застосовують метод акустичної емісії (АЕ). Однак сьогодні назріла потреба встановити кількісні показники руйнування графітових включень, яке відбувається на ранніх стадіях розвитку мікроруйнування. Для цього потрібно розробити теоретичні основи, які дали би змогу розв'язати обернену задачу про визначення розміру графітового включення, що руйнується у високоміцному чавуні (ВЧ), за параметрами сигналів акустичної емісії (САЕ).

Метою роботи є розробити теоретичні засади визначення за сигналами АЕ геометричних параметрів кулястого включення, що руйнується у матриці ВЧ, та експериментально перевірити отримані аналітичні залежності.

Постановка задачі та її розв'язання. Розглянемо задачу про руйнування еліпсоїдного включення в суцільному середовищі.

Нехай поверхня включення, що міститься в необмеженому просторі, описується рівнянням

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1, \quad a \geq b \geq c, \quad (1)$$

тобто включення є тривісним еліпсоїдом з півосями a , b , c (див. рис. 1, де позначено: 1 – включення, 2 – тріщина, 3 – матриця ВЧ).

На нескінченності тіло розтягується напруженнями σ^∞ . Співвідношення для визначення напружень у включенні має вигляд [21]

$$\sigma = \frac{q(E(k)) + 2\beta(1 - v^2)}{2\beta q(1 - v^2) + E(k)} \sigma^\infty, \quad (2)$$

де $q = E_B/E_M$ – відношення модулів Юнга графітового включення і матриці чавуну; v – коефіцієнт Пуассона; $\beta = a/c$ – відношення довжин півосей еліпсоїда; $E(k)$ – повний еліптичний інтеграл другого роду; $k^2 = (a^2 - b^2)/a^2$ [23]. Внаслідок руйнування такого включення утворюється дископодібна тріщина. Знаючи її геометричні параметри і місцезнаходження, знайдемо відповідно розміри та орієнтацію графітового включення, яке зруйнувалося.

Надалі вважаємо включення сфероїдальним. Тому $a = b$, $k^2 = 0$, $E(k) = \pi/2$. Утворення тріщини у включенні відбувається, коли розтягувальні напруження у ньому під дією прикладених зовнішніх зусиль досягають певної критичної величини σ_0 . Формула розрахунку напружень (2) тоді набуде вигляду

$$\sigma_0 = \frac{\pi q + 4\beta(1 - v^2)}{4\beta q(1 - v^2) + \pi} \sigma^{\infty*}. \quad (3)$$

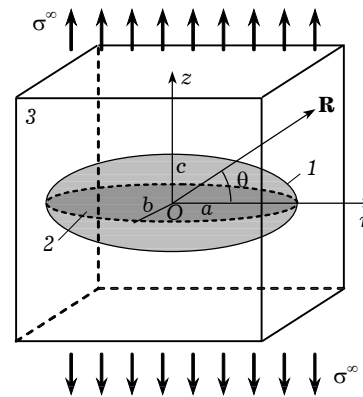


Рис. 1

Утворення тріщини супроводжується випромінюванням сигналів АЕ [16]. Для оцінки параметрів цих сигналів розглянемо динамічну задачу про утворення дископодібної тріщини в пружному просторі [24]. Введемо систему циліндричних координат $O r \theta z$ з початком O , що співпадає з центром тріщини, і віссю Oz , перпендикулярною до її площини. Граничні умови задачі з урахуванням симетрії поля напружень щодо площини тріщини записуються таким чином:

$$\begin{aligned}\sigma_{zz}(r, 0, t) &= -\sigma_0 H(t), & r < a, \\ u_z(r, 0, t) &= 0, & r > a, \\ \tau_{rz}(r, 0, t) &= 0, & 0 < r < \infty,\end{aligned}\quad (4)$$

де a – радіус тріщини, що співпадає з малою піввіссю сфероїдального включення.

Для оцінки максимальних значень модуля вектора переміщень у праці [24] одержано формулу, що відповідає приходу поздовжньої хвилі в точку спостереження:

$$U_{\max} = \delta \frac{\sigma_0 \Phi(\theta) a^2}{\rho c_1^2 R}. \quad (5)$$

Тут $\Phi(\theta)$ – кутова залежність максимальних значень модуля вектора переміщень, яка має вигляд

$$\Phi(\theta) = \frac{1 - 2\varepsilon^2 \cos^2 \theta}{\sqrt{1 + \tau \cos^2 \theta}}, \quad (6)$$

де ε – відношення швидкостей поперечної і поздовжньої хвилі (в розрахунках вважали, що $\varepsilon = 0.535$); $\delta = 0.452$ і $\tau = 0.68$ – параметри апроксимації, які визначають методом найменших квадратів, співставляючи точний розв'язок граничної задачі (4) із формулами (5), (6); ρ – густина матеріалу; R – відстань від центра дефекту до точки спостереження; c_1 – швидкість поздовжньої хвилі.

Радіус і орієнтацію тріщини визначаємо за амплітудами зареєстрованих сигналів АЕ. Нехай маємо систему, що складається з чотирьох перетворювачів АЕ (ПАЕ). За допомогою методу триангуляції знаходимо координати центру графітового включення (і тріщини, що утворилася в ньому). Амплітуди САЕ, зареєстровані ПАЕ, A_i , $i = 1, \dots, 4$, пропорційні U_{\max} :

$$A = \omega U_{\max}, \quad (7)$$

де ω – множник пропорційності між електричним сигналом і механічними переміщеннями. Розташування ПАЕ щодо центру включення характеризуються радіусами-векторами.

Орієнтацію тріщини у включенні задаємо одиничною нормаллю \mathbf{n}_0 до площини її розміщення, а напрями на ПАЕ – одиничними векторами \mathbf{n}_i , $i = 1, \dots, 4$. Для знаходження невідомих \mathbf{n}_0 і a використовуємо співвідношення (5), записавши його у вигляді

$$A_i = d/R_i \Phi(\alpha_i), \quad (8)$$

де α_i – кути, що відраховуються від нормалі до площини тріщини:

$$\theta_i = \pi/2 - \alpha_i, \quad (9)$$

$d = 0.452 \cdot \omega \cdot \sigma_0 a^2 / (\rho c_1^2)$. За перший ($i = 1$) приймаємо ПАЕ, для якого добуток $A_i R_i$ є максимальним. Одиничні вектори \mathbf{n}_i , $i = 0, 1, \dots, 4$, визначаються

напряжними косинусами b_{1j} :

$$\cos(\alpha_i) = \sum_{j=1}^3 b_{ij} b_{0j}, \quad i = 1, \dots, 4. \quad (10)$$

У сферичній системі координат $OR\theta\varphi$ співвідношення $b_{i1} = \sin \theta_1 \cos \varphi_1$, $b_{i2} = \sin \theta_1 \sin \varphi_1$, $b_{i3} = \cos \theta_1$, $i = 0, \dots, 4$, встановлюють взаємозв'язок між кутами θ_k і φ_k , які визначають орієнтацію ПАЕ, і кутами φ_0 і θ_0 , які характеризують орієнтацію тріщини.

Увівши позначення

$$\Gamma_j = \frac{A_j R_j}{A_1 R_1}, \quad j = 2, 3, 4, \quad (11)$$

визначення орієнтації тріщини зводимо до відшукування мінімуму функції

$$F(\theta_0, \varphi_0) = \sum_{j=1}^3 \left[\Gamma_j - \frac{\Phi(\alpha_j)}{\Phi(\alpha_1)} \right]^2, \quad (12)$$

де величини Γ_j встановлюють з експерименту. Знаючи орієнтацію тріщини, а, отже, і включення, на підставі залежності (5) знаходимо значення a (величину півосі включення) за амплітудою сигналу АЕ :

$$a = \sqrt{\frac{A_1 \rho R_1}{\omega \delta \sigma_0 \Phi(\theta_1)}} c_1. \quad (13)$$

Зі співвідношення (3), виконавши заміну $\frac{\sigma_0}{\sigma_{\infty*}} = s$, визначаємо значення c :

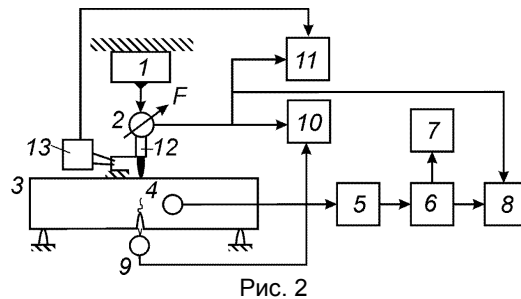
$$c = \frac{4a(1 - v^2)(sq - 1)}{\pi(q - s)}. \quad (14)$$

Беручи до уваги (13), для знаходження геометричного параметра c включення остаточно отримуємо

$$c = 4 \sqrt{\frac{A_1 \rho R_1}{\omega \delta \sigma_0 \Phi(\theta_1)}} c_1 \frac{(1 - v^2)(sq - 1)}{\pi(q - s)}. \quad (15)$$

Таким чином, на підставі амплітуд зареєстрованих сигналів АЕ, що поширюється у металічній матриці чавуну під час руйнування графітових включень, можна визначити їх геометричні розміри.

Результати експериментальних досліджень. В експериментах використовували призматичні зразки перерізу 12×18 мм з виведеними крайовими втомними тріщинами. Хімічний склад ВЧ: С – 2.44%; Mn – 0.42%; Si – 1.37%; Cr < 0.05%; P – 0.13%; S – 0.11%. Випробовували зразки за схемою триточкового згину. Структурна схема експерименту показана на рис. 2 (1 – навантажувальний пристрій; 2 – тензометричний динамометр; 3 – зразок; 4 – первинний перетворювач сигналів АЕ; 5 – попередній підсилювач; 6 – прилад АЕ типу АВН-3; 7 – осцилограф; 8 – швидкодійний самопис Н-338/6П; 9 – первинний тензометричний перетворювач розкриття берегів тріщини; 10, 11 – двокоординатний самопис ПДП4-003; 12 – індентор; 13 – первинний тензометричний перетворювач переміщення індентора).



Залежно від складу матриці ВЧ руйнується за крихким, в'язким або змішаним механізмом руйнування. Пластичність матриці зростає у такій послідовності: пластинчастий перліт, зернистий перліт, перліт-ферит, ферит. Мікромеханізми руйнування є крихкими для матриці з пластинчастого та зернистого перліту, в'язкими (з ділянками сколу) – для перлітно-феритної і для феритної матриць [1, 8].

Як показано в роботах [2, 8, 16], на початкових стадіях руйнування чавунів пошкоджені області розвиваються всередині матеріалу і локально поширюються у стиснутій зоні зразка, тому виявити їх оптично, як того вимагають методики нормативних документів [2], неможливо. Після злиття мікротріщин у макротріщини відбувається вихід останніх на бокову поверхню зразка вже після суттєвого розвитку руйнування [16]. Тому для виявлення прихованих початкових стадій руйнування чавунів ефективним є застосування методу АЕ.

Оскільки досліджувані зразки містили попередньо виведені втомні тріщини з відомою їх орієнтацією, де сконцентровані максимальні напруження під час згину, то це спростило експериментальні АЕ дослідження. Тобто за умови розміщення ПАЕ на боковій поверхні зразка підбирали його місце встановлення так, що достатньо було використовувати лише один канал реєстрації АЕ. Для спрощення розрахунків приймали, що центр ПАЕ розміщений на боковій грані зразка на тій самій висоті, що й вершина тріщини, тобто приймали, що $\cos \theta = 1$.

На рис. 3 наведено діаграми руйнування чавунів з різними типами матриць: 1 – крива залежності «навантаження P – розкриття берегів тріщини v »; 2 – схематичний розподіл амплітуд САЕ на акустограмі (рис. 3а – для феритної матриці, рис. 3б – для феритно-перлітної матриці).

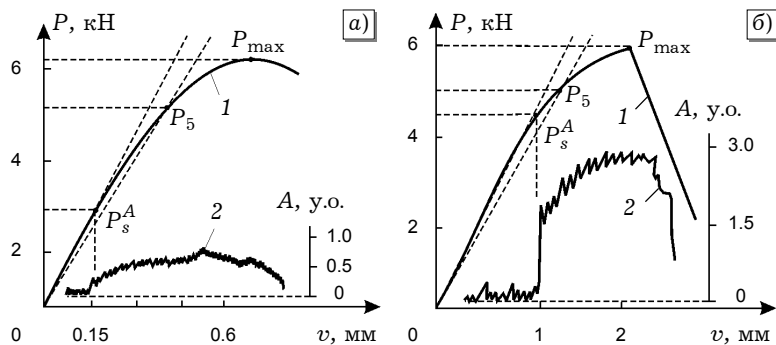


Рис. 3

Отримані дані свідчать (див. рис. 3), що для кожного типу чавунів, залежно від складу матриці, параметри сигналів АЕ були різними. На акустограмах можна виділити умовно (за часом появи та тривалості) дві групи САЕ. Сигнали першої групи виникали відразу після прикладання навантаження до зразка. Вони викликані притиркою інденторів і опор, тому під час обробки експериментальних даних їх не брали до уваги. САЕ другої групи появлялася через деякий час за величини навантаження, близького до моменту старту макротріщини. На діаграмах руйнування, наведених на рис. 3, це ділянки до точки P_s^A – зусилля навантаження, що відповідає моменту старту макротріщини, встановленого за САЕ [23] (P_5 – зусилля навантаження, отримані методом 5% січної [2]).

Оскільки міцнісні характеристики графіту є нижчими від аналогічних показників матриці, то логічно припустити, що саме руйнування графітових включень, очевидно, є джерелом генерування САЕ під час наближення до точки P_s^A . Здійснений металографічний аналіз доломів показав, що ці САЕ

можуть генеруватися також і під час відшарування графіту від металічної матриці та руйнування графітових включень, утворення мікротріщин, їх підростання і злиття [2]. Однак, на думку авторів, домінуючі амплітуди САЕ належать саме руйнуванню графітових включень, оскільки в цьому випадку їх розміри є порівняно найбільшими, а напруження у зразку відповідають межі їх міцності.

Строго ідентифікувати походження низькоамплітудних САЕ, що виникають до точки R_s^A , важко.

Усереднивши значення амплітуд на цих початкових етапах руйнування і припустивши, що вони генеруються внаслідок руйнування кулеподібних включень графіту, за допомогою даних експерименту та аналітичних залежностей визначали їх геометричні параметри.

Результати фактографічного аналізу зразка ВЧ на феритній основі ($\times 500$) та розрахунки геометричних параметрів графітового включення за формулою (15) наведено у табл. 1. Як бачимо, розміри включень, визначених за САЕ (табл. 1), мають деякі розбіжності з розмірами, отриманими з фактографічних досліджень (рис. 4). Звичайно, на результати обчислень суттєво впливає розкид експериментальних даних та інші похибки вимірювання.

Однак можна стверджувати, що метод АЕ дозволяє ефективно визначити розміри графітових включень, що руйнуються під час деформування ВЧ.

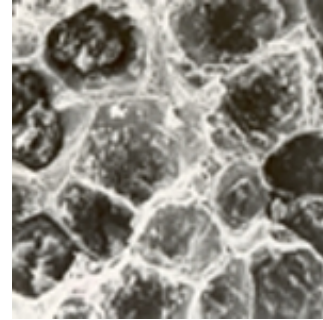


Рис. 4

Таблиця 1

матриця чавуна	межа міцності металічної матриці σ_b , МПа	амплітуда електричного сигналу на виході ПАЕ A , мкВ	діаметр графітового включення, мкм	
			фактографічний аналіз	за формулою (15)
ферит	450	60	23.42	24.39
пластинчатий перліт	800	10	19.77	19.86
зернистий перліт	680	20	21.36	22.95
пластинчатий перліт 20% фериту	600	25	20.20	22.06

Висновки. Метод АЕ завдяки своїй високій чутливості дозволяє ефективно виявляти ранні стадії зародження і розвитку руйнування. Для визначення розмірів кулястих графітових включень у ВЧ необхідно використовувати багатоканальні АЕ-засоби. Однак під час проведення АЕ-досліджень у лабораторних умовах за відомих розмірів зразків, орієнтації площини тріщини тощо це можливо здійснити з використанням одноканальних засобів.

Отримані аналітичні залежності дозволяють за амплітудами САЕ оцінити геометрію кулястого включення, що руйнується у ВЧ під час навантаження чи деформації.

1. Вязкость разрушения высокопрочных материалов / Под. ред. М. Л. Берштейна. – Москва: Металлургия, 1973. – 309 с.
2. ГОСТ 25.506–85. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – Москва: Изд-во стандартов, 1985. – 62 с.

3. Грилицький Д. В., Сулим Г. Т. Периодическая задача для упругой плоскости с тонкостенным включением // Прикл. математика и механика. – 1975. – **39**, № 3. – С. 520–529.
4. Канаун С. К. Тонкий дефект в однородной упругой среде. Исследование по теоретическим основам расчета строительных конструкций // Тр. Ленингр. инж.-строит. ин-та: Межвуз. темат. сб. – 1983. – С. 75–84.
5. Кит Г. С., Емец В. Ф., Кунец Я. И. Асимптотическое поведение задачи рассеяния упругой волны тонкостенным инородным включением // Изв. РАН. Механика твердого тела. – 1999. – № 3. – С. 55–63.
6. Колодезний Л. А., Козырев Г. В., Митерев Г. И. Сравнительная оценка работы распространения трещины в высокопрочных чугунах и сталях / Алтайск. Гос. техн. ун-т. Резервы пр-ва. строит. матер. – Барнаул, 1999. – С. 159–163.
7. Кунець Я. І., Матус В. В., Міщенко В. О. Дистанційне визначення фізико-механічних параметрів тонкостінних дефектів // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2000. – **36**, № 5. – С. 117–118.
8. Лисак Н. В., Скальський В. Р., Сергиенко О. Н. Использование метода акустической эмиссии для исследования разрушения чугунов // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. – 1989. – № 3. – С. 37–45.
9. Мовчан А. Б., Назаров С. А. Асимптотика НДС вблизи пространственного пикообразного включения // Механика композитных материалов. – 1985. – № 5. – С. 792–800.
10. Панасюк В. В., Андрейкив А. Є., Стадник М. М. Пружна рівновага необмеженого тіла з тонким включенням // Доп. АН УРСР. – 1976. – № 7. – С. 636–639.
11. Панасюк В. В., Стадник М. М., Силованюк В. П. Концентрация напряжений в трехмерных телах с тонким включением. – Киев: Наук. думка, 1986. – 216 с.
12. Підстригач Я. С. Умови стрибка напружень і переміщень на тонкостінному пружному включенні в суцільному середовищі // Доп. АН УРСР. Сер. А. – 1982. – № 12. – С. 29–31.
13. Пороховський В. В., Кунець Я. І. Дифракція імпульсів пружних хвиль тонкими слабкими неоднорідностями // Мат. методи та фіз.-мех. поля. – 1999. – **42**, № 2. – С. 168–174.
14. Силованюк В. П. Жесткое пластическое включение в упругом пространстве // Физ.-хим. механика материалов. – 1984. – **20**, № 5. – С. 80–84.
15. Силованюк В. П. Руйнування попередньо напружених і трансверсально-ізотропних тіл із дефектами. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2000. – 300 с.
16. Скальський В. Р., Коваль П. М. Акустична емісія під час руйнування матеріалів, виробів і конструкцій. Методологічні аспекти відбору та обробки інформації. – Львів: Сполом, 2005. – 396 с.
17. Стадник М. М. Интегро-дифференциальные уравнения трехмерной задачи теории упругости для тела с системой тонких включений // Физ.-хим. механика материалов. – 1984. – **20**, № 1. – С. 15–21.
18. Стадник М. М. Об одном методе приближенного решения трехмерной упругой задачи для тела с тонким включением // Физ.-хим. механика материалов. – 1988. – **24**, № 1. – С. 53–65.
19. Стадник М. М., Андрейкив А. Е. Прочность материалов содержащих системы тонких включений // Физ.-хим. механика материалов. – 1986. – **22**, № 1. – С. 29–35.
20. Стадник М. М., Морозович Я. Ю. Термоупругая задача для выпуклого многогранника с системой тонких включений // Физ.-хим. механика материалов. – 1986. – **22**, № 2. – С. 39–43; – **22**, № 3. – С. 89–96.
21. Структура та опір руйнуванню залізовуглецевих сплавів / О. П. Остап, І. П. Волчок, О. Б. Колотілкін та ін. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2000. – 272 с.
22. Хай М. В. Интегральные уравнения задачи про визначення напружень в тілі з тонким чужорідним включенням // Доп. АН УРСР. Сер. А. – 1984. – № 3. – С. 43–46.
23. Andreykiv O. Ye., Lysak M. V., Serhienko O. M., Skalsky V. R. Analysis of acoustic emission caused by internal crack // Eng. Fract. Mech. – 2001. – **68**, No. 7. – P. 1317–1333.
24. Skalsky V. R., Okrepky Yu. S., Plakhtij R. M. Acoustic emission during cast irons fracture // Proc. Int. III Sympos. Mechaniki Zniszczenia Materialow i Konstrukcji, (Augustow, 1–4 czerwca 2005, Poland). – Bialystock, 2005. – P. 369–371.
25. Wieland R. Über die Geschichte des Eisennbaus und das Entstehen des Konstruktiven Ingenieurbaus // Stahlbau. – 2001. – **70**, No. 9. – P. 628–634.

АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ РАЗРУШАЮЩЕГОСЯ ГРАФИТОВОГО ВКЛЮЧЕНИЯ

Сформулированы теоретико-экспериментальные принципы определения по сигналам акустической эмиссии геометрических параметров шаровидного графитового включения, которое разрушается в матрице высокопрочного чугуна под воздействием квазистатической нагрузки. Проведено сравнение полученных экспериментальных данных с результатами металлографического анализа. Показано, что метод акустической эмиссии позволяет эффективно выявлять ранние стадии зарождения разрушения в высокопрочных чугунах, а полученные данные хорошо согласуются с результатами расчетов аналитической зависимости.

ACOUSTIC-EMISSION ANALYSIS OF GRAPHITE INCLUSION SIZE WHICH FAILS IN STRAIN

Theoretical and experimental principles for evaluation of geometric parameters of spherical graphite inclusion which fails in the matrix from cast iron under quasi-static loading, by the acoustic-emission signals, are derived. Comparison of experimental data and results of metallographic analysis is carried out. Effective identification of early stages of fracture in cast-irons by the acoustic-emission method and well correlates of obtained information and analytical dependences are shown.

Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка
НАН України, Львів

Одержано
26.01.07