



УКРАЇНА

(19) UA (11) 71708 (13) A  
(51) 7 G01N29/04МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ  
НА ВИНАХІДвидається під  
відповідальність  
власника  
патенту

## (54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУГ

1

2

(21) 2003076184

(22) 23.10.2003

(24) 15.12.2004

(46) 15.12.2004, Бюл. № 12, 2004 р.

(72) Абрамов Валерій Сергійович, Бусов Володимир Львович, Дементій Володимир Романович, Заїка Володимир Миколайович

(73) Абрамов Валерій Сергійович, Бусов Володимир Львович, Дементій Володимир Романович, Заїка Володимир Миколайович

(57) Спосіб визначення рівня залишкових напруг шляхом порушення у виробі імпульсів ультразву-

кової хвилі і визначення її коефіцієнта загасання, який **відрізняється** тим, що уздовж шляху звучання реєструють луна-сигнал структурних шумів, по амплітудах якого судять про розподіл коефіцієнта розсіювання ультразвукових хвиль по глибині виробу, при цьому експериментально-розрахунковим шляхом визначають розподіли середньої пружної і середньої пластичної деформацій по глибині виробу, по яких судять про розподіл величин компонентів головних залишкових напруг по глибині виробів.

Винахід відноситься до дослідження фізичних властивостей матеріалів і може знайти застосування при визначенні надійності виробів.

Відомий метод акустичної емісії переманічування феромагнетиків, у якому матеріал збуджують низькочастотним перемінним магнітним полем, приймають сигнали акустичної емісії стрибків Баркгаузена, по числу імпульсів якої судять про рівень залишкових напруг у матеріалі (Волков В.В. і ін. Можливості оцінки напруг у сталях методом акустичної емісії при переманічуванні. Праці все-союзного симпозиуму по залишковим напругам і методам їхнього регулювання. Москва, с.141-145 (1982)).

Основним недоліком цього методу є недостатня вірогідність контролю для великогабаритних виробів тому що товщина інформаційного шару не перевищує 10-30 мм, а також вплив неоднорідності розподілу коефіцієнта загасання пружних хвиль по обсязі полікристалічного матеріалу на рівень сигналу акустичної емісії, що може істотно спотворити число реєстрованих імпульсів при даному рівні вибірки. Крім той метод непридатний для широкої сукупності не феромагнітних металів і сплавів, що звужує функціональні можливості способу.

Відомий ультразвуковий метод акустичної пружності, заснований на залежності пружних постійних третього порядку чи змін швидкостей поширення ультразвукових (у. з.) хвиль від величини внутрішніх чи залишкових напруг, у якому паралельно-плоский виріб звучатимуть по методу автоциркуляції імпульсу для одержання високої чутливості до змін швидкості ультразвуку (Бобренко В.М. Акустичний метод контролю напруженого стану матеріалів елементів машин, Штінца, Кишинів, с.148 (1981)).

Найбільш близьким по технічній сутності й ефекту, що досягається, до пропонованого винаходу є спосіб контролю рівня залишкових напруг, описаний у (R.K.Klinman, G.R. Webster, F.J. March, S.T. Stephenson, Ultrasonic Prediction of grain size, strength and toughness in plain carbon steel, Material Evaluation, №10, р. 26-32 (1980)), при якому в матеріалі збуджують ультразвукові коливання, методом багаторазових відображень визначають коефіцієнт загасання ультразвукових хвиль і по кореляційному зв'язку між коефіцієнтом загасання і границями текучості, міцності судять про рівень залишкових напруг.

Основним недоліком способу є те, що поперше він дозволяє побічно оцінити рівень залишкових напруг за допомогою кореляційного зв'язку між границею текучості, що відбиває опір деформуванню в умовах одноосового розтягання, і коефіцієнтом загасання; по-друге такий зв'язок був отриманий для відпалених сталевих виробів, що мають різну температуру нагрівання, різну величину первинного зерна чи аустеніту коефіцієнта загасання у. з. хвиль. Для загартованих виробів, нагрітих під загартування до однакової температури, що мають однакове первинне зерно, але від-

(13) A

(11) 71708

(19) UA

пущених при різних температурах, такий зв'язок між границею текучості і коефіцієнтом загасання невідомий, що звукує функціональні можливості способу контролю. Крім того ці можливості способу звужені обмеженням на форму (площопаралельність граней) виробу.

Метою дійсного винаходу є підвищення вірогідності контролю при розширенні функціональних можливостей.

Поставлена мета досягається тим, що згідно способу визначення рівня залишкових напруг шляхом порушення у виробі імпульсів ультразвукової хвилі і визначення її коефіцієнта загасання, що відрізняється тим, що уздовж шляху звучання реєструють луни-сигнал структурних шумів, по амплітудах яких судять про розподіл коефіцієнта розсіювання ультразвукових хвиль по глибині виробу, при цьому експериментально-розрахунковим шляхом визначають розподіли середньої пружної і середньої пластичної деформацій по глибині, по яких судять про розподіл величин компонентів головних залишкових напруг по глибині виробів.

Фізична сутність винаходу полягає в тім, що відповідно до концепції В.Л. Инденбома (Сучасна кристаллографія (у чотирьох томах), Т. 3. Утворення кристалів, А.А. Чернов, Е.И. Гіваргізов, Х.С. Багдасаров і ін., с.200-209, Наука, Москва (1980)) при нагріванні під загартування нерівномірний розподіл температури по глибині приводить до неоднакового теплового розширення різних його обсягів і до появи термічних напруг. Згідно прин-

ципу Ле Шательє-Брауна матеріал прагне погасити (зняти) ці напруги шляхом пластичного плину і відповідного розподілу дислокацій. В охолодженому матеріалі виникнуть залишкові напруги  $\hat{\sigma}_r$ , близькі по величині, але протилежні за знаком вихідним термічним напругам, що викликали пластичний плин. Термічні напруги  $\hat{\sigma}_t$  виконують роль деформуючого напруги  $\hat{\sigma}_i$ , що відбиває опір деформуванню матеріалу, і сутність концепції виражають співвідношенням:

$$\hat{\sigma}_r \approx -\hat{\sigma}_t.$$

Відповідно до роботи (В.Л. Бусов, Про співвідношення внесків складових деформуючого напруги для фрагментованих полікристалів, укр. Журнал Фізика і Техніка Високих Тисків Донецьк, ДонФТИ (у печатці)) виділяють усі внески в деформуючу напругу при пластичному плинні аж до руйнування і знаходять їхнє співвідношення, приймаючи як фрагменти пластини мартенситу, потім вибирають базовий внесок:  $\hat{\sigma}_f$  - напруга, робота якого йде на ріст вільної пружної енергії фрагментів (у нашому випадку мартенситних пластин), що виникають при структурних фазових і кінетичних переходах (тут при зсуві і повороті проміжфазних границь мартенсит - аустеніт і границь двійників). Вираження для  $\hat{\sigma}_f$ , з тієї ж роботи можна перетворити у таке:

$$\hat{\sigma}_f(z) = \frac{1}{k_\alpha} \hat{c}^* \cdot \left[ \frac{d\alpha_s(z)}{dz} (\hat{E}^{el}(z))^2 + \alpha_s(z) \hat{E}^{el} \cdot \frac{d\hat{E}^{el}(z)}{dz} \right] \left( \frac{d\hat{E}^{pl}(z)}{dz} \right)^{-1}$$

де  $\hat{c}^*$  - ефективний тензор модулів пружності (Т.Д. Шермергор, Теорія пружності мікронеоднорідних середовищ, Наука, Москва (1977));  $k_\alpha$  - числовий коефіцієнт;  $\alpha_s$  - коефіцієнт розсіювання у з. хвиль; залежності компонентів тензорів середньої пружної деформації  $\hat{E}^{el}$  і середньої пластичної деформації  $\hat{E}^{pl}$  від глибини  $z$  визначають: експериментально рентгеноструктурним методом для  $\hat{E}^{el}$  (Експериментальна механіка: У 2-х кн.: Кн.2, Під ред. А.Кобаясі, Світ, Москва, с.325-332, (1990)) і експериментально-розрахунковим шляхом для  $\hat{E}^{pl}$  (В.Е.Панин, В.А.Лихачов, Ю.В. Гриняев, Структурні рівні деформації твердих тіл, Наука, Новосибірськ, с.202-210, (1985)). Залежність  $\alpha_s = \alpha_s(z)$  одержують експериментально-розрахунковим шляхом з розподілу амплітуди луни-сигналу структурних шумів згідно (В.Л. Бусов, Акустичний метод зворотного розсіювання в досвідах під навантаженням і перспективи його розвитку, ФТВД, №1 (2003)). Для виробів осесиметричної форми головні значення  $\hat{\sigma}_f$ : радіальні, осьові й окружні напруги знаходять з останнього тензорного рівняння, що відбиває функціональний зв'язок

$$\hat{\sigma}_f = \hat{\sigma}_f \left( \alpha_s, \hat{E}^{el}, \hat{E}^{pl}, \frac{d\alpha_s}{dz}, \frac{d\hat{E}^{el}}{dz}, \frac{d\hat{E}^{pl}}{dz} \right).$$

У першому наближенні використовують принцип рівнорозподілу привнесеної в матеріал пруж-

ної енергії по усіх внесках у деформуючу напругу, потім в умовах конкретного напруго-деформованого стану розрахунковим шляхом (методом ітерацій) уточнюють співвідношення внесків, знаходять сумарний коефіцієнт і множать його на величину базового внеску.

Пропонований спосіб визначення залишкових напруг має істотні відмінності, що полягають у розкладанні компонентів залишкових напруг на окремі внески, використанні функціональної залежності базового внеску від деформаційних і акустичних характеристик, отриманих з розподілів середніх пружних і пластичних деформацій по глибині виробу і відповідно розподілів амплітуди луни-сигналу структурних шумів уздовж шляху звучання і коефіцієнта розсіювання у з. хвиль по глибині виробу, обчисленні шуканих компонентів тензора залишкових напруг шляхом множення величин відповідних компонентів базового внеску на сумарний коефіцієнт, отриманий зі співвідношення внесків. Ознаки, що відрізняють пропонований винахід, у науці і техніку не виявлені.

У такий спосіб, що заявляється, завдяки наявності нових ознак, дозволяє одержати позитивний ефект і, отже, він має властивості, якими не володіє прототип чи подібні з ним способи, тобто спосіб, що заявляється, має істотну відмінність.

Пристрій, що реалізує спосіб визначення рівня залишкових напруг, зображено на Фіг.1.

Пристрій, що реалізує спосіб визначення рівня залишкових напруг, містить: локально - іммерсійну

ванну 1 з пьезоперетворювачем 2, серійний дефектоскоп 3, наприклад УД2-12 (Молдова); при автоматизованому процесі обробки інформації - додатково блок сполучення, що включає аналого-цифровий перетворювач 4 з частотою дискретизації 100-1000MHz, буферний запам'ятовуючий пристрій 5 (динамічна оперативна пам'ять), і персональний комп'ютер 6.

Спосіб визначення рівня залишкових напруг здійснюється в такий спосіб.

Локально-іммерсійну ванну з пьезоперетворювачем установлюють на контрольовану поверхню виробу осьосиметричної форми, наповняють ванну рідиною, наприклад водою з антикорозійними добавками, сканують інформаційний шар усього виробу, обертуючи виріб і переміщаючи ванну дискретно з визначеним кроком уздовж утворюючої виробу; прозвучання роблять для N крапок контрольованої поверхні. У кожній такій крапці при куті введення ультразвукових хвиль більше першого критичного кута виділяють луна-сигнал структурних шумів і за допомогою блоку сполучення і динамічної пам'яті переносять цей сигнал на екран монітора персонального комп'ютера, розподіл коефіцієнта розсіювання ультразвукових хвиль по глибині виробу знаходять за допомогою обраного алгоритму, наприклад згідно (В.Л. Бусов, Акустичний метод зворотного розсіювання в досвідах під навантаженням і перспективи його розвитку, ФТВД, №1 (2003)) статистичну обробку для N крапок роблять за допомогою стандартних додатків. Для визначення розподілу середньої пружної деформації по глибині  $\bar{\epsilon}^{el} = \bar{\epsilon}^{el}(z)$  з готового виробу вирізують у радіальній площині плоско-рівнобіжні темплети, для яких у тій же площині рентгеноструктурним методом роблять виміри в ряді крапок від поверхні виробу уздовж його радіуса всередину за допомогою переносної рентгенівської установки. Для визначення розрахункового розподілу середньої пластичної деформації по глибині  $\bar{\epsilon}^{pl} = \bar{\epsilon}^{pl}(z)$  використовують прямо пропорційні залежності  $\bar{\epsilon}^{pl}$  від середніх щільностей проміжфазних границь аустеніт-мартенсит і границь двійників, які у свою чергу лінійно залежні спочатку від щільності мартенситу, а потім від мікротвердості матеріалу. При відомій кривій мікротвердості по глибині виробу і розрахунковій пластичної деформації на поверхні знаходять коефіцієнти пропорційності і шуканий розподіл. На Фіг.2 і 3 приведені такі розподіли для конкретного режиму поверхнево-об'ємного загартовування, марки сталі і діаметра валка.

Фіг.2. Розподіл упругої тангенціальної (окружної) відносної (головної) деформації  $\epsilon_t \equiv \epsilon_t^{el}$  по глибині загартованого шару робочого шару діаметром 564 мм (сталь Ст.60Х2СМФ, загартовування ТПЧ).

Коментарі до Фіг.2: Результати отримані за допомогою рентгенівського дифрактометра ДРОН-3М. При вимірах поперечний темплет валку підвищувався у вертикальній площині спеціальним підвісом і закріплювався в модернізованому (з стандартного) власнику зразків (с гоніометром). Падаючий пучок випромінювача і розсіяний пучок,

виділюваний лічильником установки, знаходилися постійно в горизонтальній площині, зміна кута  $\psi$  вироблялася за допомогою гоніометра при відповідній синхронізації руху гоніометра і лічильника. Використано  $K_{\alpha 1}$  випромінювання Со-анода, що монохроматизовано. Значення відповідної головної напруги  $\alpha$  від упругої деформації  $\epsilon$  знаходили методом  $\sin^2 \psi$  (див. Експериментальна механіка в 2-х кн.: Кн.2., Під ред. А.Кобаясі - М., Мир, 1990, с.325-332) через коефіцієнт  $k = E/(1+\nu)$ , де  $E$  - модуль Юнга ( $E = 2.1 \cdot 10^{11}$  Па);  $\nu$  - коефіцієнт Пуассона; ( $\nu = 0.28$ ). Розподіли інших головних напруг: осьових й окружних (тангенціальних)  $\sigma_z$ ,  $\sigma_r$  і зв'язаних з ними через коефіцієнт  $k$  відповідних упругих деформацій  $\epsilon_z$ ,  $\epsilon_r$  і відношення між ними добре відомі (див. В.П. Полухин і інші. Надійність і довговічність валков холодної прокатки, М., Металургія, 1971, с. 377), причому розподіли і значення величин  $\sigma_r(\epsilon_r)$ ,  $\sigma_z(\epsilon_z)$  в області загартованого шару практично збігаються; розподіл радіальних  $\sigma_r(\epsilon_r)$ , що розтягують, має в середньому прямокутну форму і по значенню  $\epsilon_r \approx (5 - 7) \cdot \epsilon$ .

Фіг.3а. Залежність деформації пластичності руйнування від напруг при відпустці мартенситу сталей Ст.20 (1), Ст. 45 (2,3); У10 (4); при В2→В19 - перетворенні TiNi (10) і TiNiCu (7); при  $\gamma \rightarrow \omega$  - перетворенні в сплаві Fe 18% Mn (8); при ГЦК→ГЦТ - перетворенні в сплавах Cu 62% Mn (6), Cu 72% Mn (5) і Cu 88% Mn (9); при вигині (3,10), при розтяганні (7) і при крутінні (1,2,4,6,8,9). Відпустка мартенситу здійснена нагріванням до 620 (1,2,4) і 720°K (3).  $M_1$  - масштаб для всіх кривих, крім 3;  $M_2$  - для кривої 3.  $M'_1$  - масштаб

для кривих 3, 7;  $M'_2$  - масштаб для кривих 1,2,4-6,8-10. (Дані з роботи: В.Е. Панін, В.А. Ліхачов, Ю.В. Гриняев Структурні рівні деформації твердих тіл. Новосибірськ, Наука, 1985, с.206).

Коментарі до Фіг.3а та 3б:

Експериментальні залежності, що на Фіг.3а и 3б, підтверджують теоретичні висновки двох виражень

$$\hat{\beta}^{pl} = A \text{Sp} \hat{T} - B \rho \hat{T}^d \hat{\sigma}^d,$$

(формула (101), роб. В.Е. Паніна та ін.)

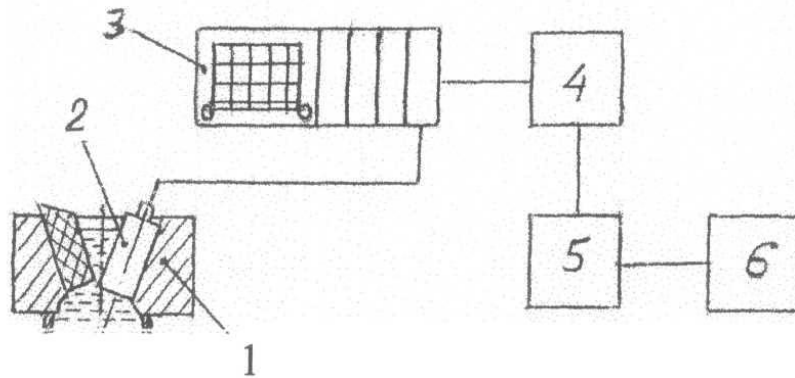
где  $\hat{\beta}^{pl}$  - тензор пластичної дісторсії,  $A$ ,  $B$  - чисельні коефіцієнти;  $\rho$  - щільність межфазних границь аустеніт-мартенсит і двійників (між щільністю  $\rho$  і щільністю мартенситу, що може бути знайдена з кривої мікротвердості, є зв'язок (див. Г.В. Курдюмов, Л.М. Утевський, Р.І. Ентін. Перетворення у залізі та сталі, Наука. Москва (1977);  $\text{Sp} \hat{T}$  та  $\hat{T}^d$  - відповідно кульова и девіаторна частини тензора повної дісторсії фазового перетворення аустеніт-мартенсит;  $\hat{\sigma}^d$  - девіаторна частина зовнішніх, у даному випадку термічних напруг. Ці напруги є термоупругі і можуть бути представлені згідно (див. Теорія упругості мікронеоднорідних середовищ, Москва, Наука, с.293 (1977):

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}^t \alpha_{kl} \Delta t,$$

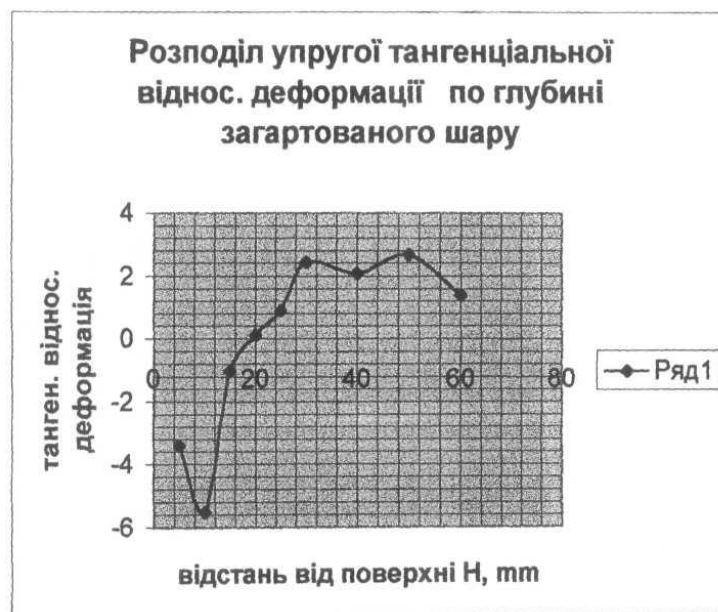
де перепад температур  $\Delta t = t_2 - t_1$  виразимо через градієнт температур  $\nabla t$  по глибині  $Z$ :  $\Delta t = \nabla t$

$\Delta z$ ,  $\Delta z$  - крок між вузлами інтервалу глибин;  $c_{ijkl}^t$  - тензор модулів пружності при постійній температурі;  $\alpha_k$  - тензор теплового розширення (Таблиці

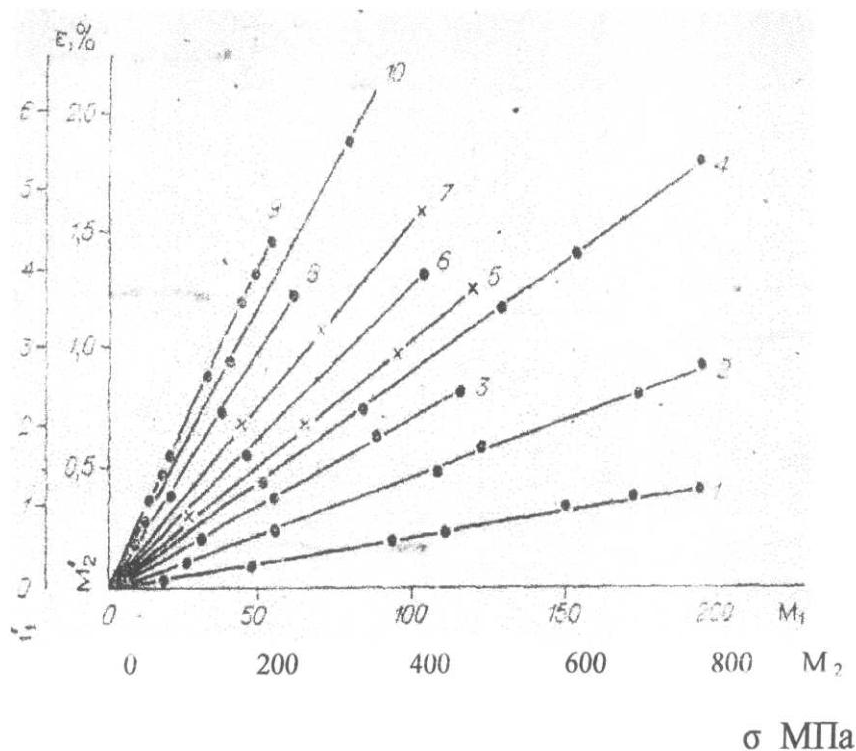
фізичних величин, Довідник, Москва, Атомвидавництво, с.110 (1976)). Залежність на Фіг.3b дозволяє знайти ці напруги.



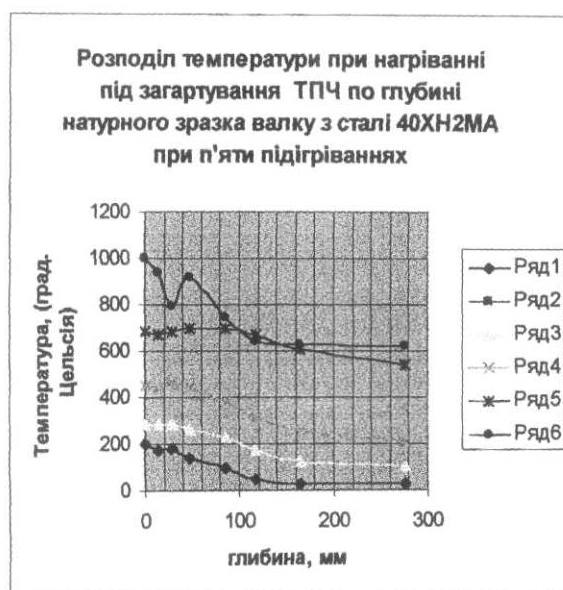
Фіг.1



Фіг.2.



Фіг. 3 а.



Фіг. 3b.