

УДК 539.261:539.319

Д-р фіз.-мат. наук С. В. Лоскутов, С. В. Сейдаметов, М. О. Щетініна

Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя

УДОСКОНАЛЕННЯ РЕНТГЕНІВСЬКОГО СПОСОБУ ВИЗНАЧЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ

Розглянуто рентгенівський спосіб визначення поверхневих залишкових напружень, заснований на відомому методі « $2\theta - \sin^2 \psi$ ». Запропоновано підвищення точності вимірювання величини залишкових напружень шляхом використання значення модуля Юнга поверхневого шару металевого зразка, отриманого експериментально методом кінетичного індентування. Представлено результати досліджень розподілу залишкових напружень по поверхні лопаток обома способами.

Ключові слова: поверхневі залишкові напруження, рентгенівський метод, модуль Юнга, кінетичне індентування.

Вступ

Процеси деформування і руйнування матеріалу деталей значною мірою пов'язані з напружено-деформованим станом поверхневого шару металевих виробів. Саме тому величина і розподіл поверхневих залишкових напружень є важливими характеристиками для оцінки стану матеріалу.

Одним із перспективних неруйнівних методів дослідження залишкових напружень на поверхні металевих виробів є рентгенівський метод. Підвищення точності визначення поверхневих залишкових напружень рентгенівським методом було метою даної роботи.

Найбільш поширеним методом рентгенодифрактометричного вимірювання залишкових макроскопічних напружень є метод « $2\theta - \sin^2 \psi$ », де θ – кут Вульфа-Брегга, ψ – кут між нормаллю до площини, що відбивають промені, та нормаллю до поверхні зразка. Відбиття рентгенівського променя від сімейства паралельних кристалічних площин відбувається тільки при певному значенні кута падіння θ , пов'язаного з довжиною хвилі падаючого випромінювання λ і міжплощинною відстанню d_{hkl} законом Брегга:

$$\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta. \quad (1)$$

Спосіб визначення залишкових поверхневих напружень в металах полягає в опромінюванні рентгенівським променем досліджуваного об'єкту, що послідовно встановлюється під різними кутами до напрямку рентгенівського променя, реєстрації відбитих рентгенівських променів детектором, визначенні центру тяжіння дифракційних піків і обчисленні величини поверхневих напружень за формулою [1]:

$$\sigma = -\frac{E}{2(1+\nu)} \operatorname{ctg} \theta \frac{\partial(2\theta)}{\partial \sin^2 \psi}, \quad (2)$$

де E – модуль Юнга, який визначається розрахунком для аналізованих площин кристалічної решітки, або використовується табличне значення для полікристалічного металу; ν – коефіцієнт Пуассона.

Для розрахунків за формулою (2) вже не потрібно досліджувати зразок, в якому макронапруження відсутні. Необхідно побудувати залежність певного експериментального положення подвійного брегівського кута 2θ від значень $\sin^2 \psi$ і потім за графіком визначити значення похідної, що входить в розрахункову формулу (1) як множник. Якщо пряма в цих координатах утворює гострий кут з віссю абсцис, то це означає, що напруження розтягуючі; якщо кут тупий, то справа у формулі виходить знак плюс, і напруження стискуючі.

Даний метод забезпечує визначення залишкових напружень в кристалічних матеріалах без руйнування зразка або деталі, не вимагає спеціального еталону.

До недоліків способу визначення залишкових напружень [1] відноситься використання в розрахунковій формулі табличних значень модуля Юнга, отриманих при випробуваннях матеріалів на одноосне розтягування, або табличних значень для монокристалів. Дійсні ж значення модуля Юнга матеріалу приповерхневого шару, аналізовані рентгенівським методом на глибину декількох десятків мікрометрів, можуть відрізнитися від табличних для даного матеріалу на 20...30 % [2]. Підставою для цього є зміни модуля Юнга металів при пластичній деформації. Модуль пружності конструкційних металевих матеріалів силь-

но залежить від природи самого матеріалу (сплави алюмінію – $7,2 \cdot 10^3$ кг/мм², сплави титану – $11 \cdot 10^3$ кг/мм², сталі – $20 \cdot 10^3$ кг/мм²) слабо залежить від хімічного складу в групі матеріалів (титановий сплав ВТ14 – $11 \cdot 10^3$ кг/мм², ВТ7 – $11,4 \cdot 10^3$ кг/мм²); залежить від нагартовки поверхні при прокаті, штампуванні; залежить від термічного гарту, старіння; і дуже сильно залежить від температури (для сплаву титану ВТ3-1 модуль E при температурі 20 °С дорівнює $11,5 \cdot 10^3$ кг/мм², а при 500 °С – $8 \cdot 10^3$ кг/мм², тобто відрізняється на 32 %). Тому для розрахунків залишкових макроскопічних напружень використання значень модулів E з довідкових даних не завжди обґрунтоване.

Для вирішення цього недоліку пропонується використання значення модуля Юнга приповерхневого шару металевого зразка, визначеного експериментально методом кінетичного індентування [3].

Використання методу кінетичного індентування для визначення модуля Юнга приповерхневого шару металевого зразка дозволяє підвищити точність й достовірність визначення величини залишкових напружень.

Для спрощення визначення розподілу залишкових напружень по поверхні металевих зразків одного й того ж матеріалу пропонується наступне:

- методом кінетичного індентування на даній ділянці зразка після зміцнюючої обробки визначити модуль Юнга поверхневого шару металу E ;
- для даного зразка на обраній ділянці виміряти дані для визначення залишкових напружень рентгенівським методом « $2\theta - \sin^2 \psi$ »;
- провести ізотермічний відпал дефектів зразка і знову методом кінетичного індентування визначити модуль Юнга E_0 ;
- визначити постійну матеріалу зразка k :

$$E = E_0 \sqrt{1 + k\sigma^2} \quad [4];$$

- розрахувати значення залишкових напружень по $\sigma = (k' - k)^{-1/2}$, де

$$k' = \frac{4(1+\nu)^2}{E_0^2} \left[\operatorname{tg}^2 \theta \left(\frac{d(2\theta)}{d(\sin^2 \psi)} \right)^{-2} \right]. \quad (3)$$

Отже, для визначення залишкових напружень по поверхні металевих деталей необхідно провести рентгенівський аналіз обраних ділянок і знайти допоміжну величину k' по формулі (3), причому E_0 і k є постійними величинами для даного матеріалу. Даний метод спрощує процедуру знаходження залишкових напружень, так як вже немає необхідності кожного разу знаходити мо-

дуль Юнга поверхневого шару металу методом кінетичного індентування.

Експериментальна методика

Для визначення залишкових макроскопічних напружень застосовували метод « $2\theta - \sin^2 \psi$ ». Рентгенівські вимірювання виконували на трубці з кобальтовим анодом (K_β -лінія) за напруги 30 кV і струму 30 mA. Площа аналізованої ділянки поверхні зразка 1×4 мм². Трикратно сканували з кроком $0,1^\circ$ і сталою часу 10 s. Дані, отримані на рентгенівському дифрактометрі, обробляли за програмою «Origin» в такій послідовності: згладжування кривих; віднімання фону; апроксимація за Гаусом; розрахунок центра ваги піків.

Модуль Юнга E досліджуваного зразку визначали методом кінетичного індентування за формулою:

$$E = \frac{1 - \mu^2}{4 \frac{D}{3} - \frac{1 - \mu_i^2}{E_i}}, \quad (4)$$

де E_i , μ_i – модуль Юнга та коефіцієнт Пуасона індентора (табличні значення); D – модуль контактної пружності досліджуваного зразка (входить у розв'язок задачі Герца для пружної взаємодії двох тіл [5]), який визначали експериментально.

Досліджувані ділянки поверхні лопаток показані на рис. 1.

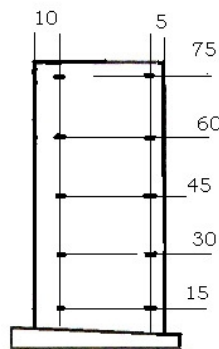


Рис. 1. Схема ділянок рентгенівського аналізу на поверхні пера лопаток

Результати та їх обговорення

Визначення розподілу залишкових напружень по поверхні пера лопатки традиційним рентгенівським методом приводить до іншого розподілу. За запропонованим способом (рис. 2) отримуємо гладший розподіл їх по поверхні деталі, що є більш обґрунтованим, оскільки макроскопічні залишкові напруження повинні бути зрівноважені по всьому зразку і створювати монотонний розподіл макронапружень по поверхні.

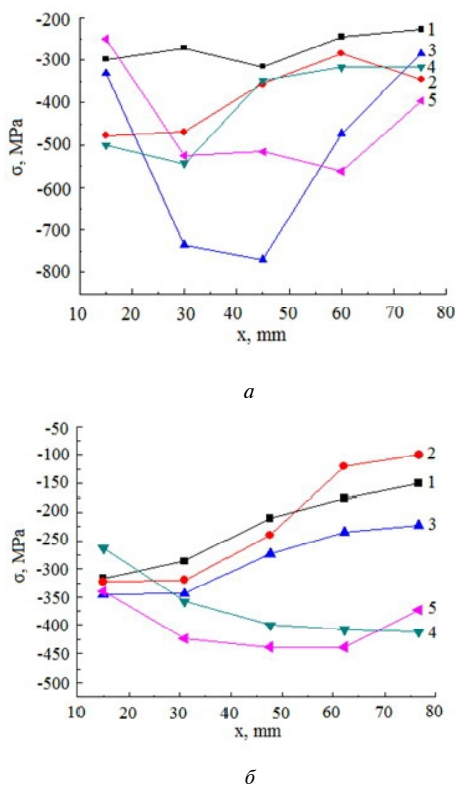


Рис. 2. Розподіл залишкових напружень по поверхні пера лопаток за традиційним способом (а) і за способом, що пропонується (б)

Висновки

Запропоновано підвищити точність визначення величини залишкових макронапружень рентгенівським способом « $2\theta - \sin^2 \psi$ » шляхом вико-

ристання модуля Юнга поверхневого шару металевго зразка, отриманого експериментально методом кінетичного інденування.

Результати досліджень поверхонь лопаток показали, що використання запропонованого методу призводить до рівномірнішого розподілу залишкових напружень по поверхні лопаток.

Список літератури

1. Васильев Д. М. Современное состояние рентгеновского способа измерения макронапряжений / Д. М. Васильев, В. В. Трофимов // Заводская лаборатория. — 1984. — Т. 50. — С. 20–29.
2. Скуднов В. А. Предельные пластические деформации металлов / В. А. Скуднов. — М. : Металлургия, 1989. — 176 с.
3. Бульчев С. И. Исследование физико-механических свойств материалов в приповерхностном слое и в микрообъемах методом непрерывного вдавливания индентора (обзор) / С. И. Бульчев, В. П. Алехин, М. Х. Шоршоров // Физика и химия обработки материалов. — 1979. — № 5. — С. 69–82.
4. Жуковский В. К. Связь коэффициента линейного температурного расширения с остаточными напряжениями / В. К. Жуковский, А. Р. Гохман // Журнал технической физики. — 2009. — Т. 79. — С. 54–57.
5. Ландау Л. Д. Теория упругости / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — М. : Наука, 1987. — 247 с.

Поступила в редакцию 19.06.2014

Лоскутов С.В., Сейдаметов С.В., Щетинина М.О. Усовершенствование рентгеновского способа определения поверхностных остаточных напряжений

Рассмотрен рентгеновский способ определения поверхностных остаточных напряжений, основанный на известном методе « $2\theta - \sin^2 \psi$ ». Предложено повышение точности измерения величины остаточных напряжений путём использования значения модуля Юнга поверхностного слоя металлического образца, полученного экспериментально методом кинетического инденування. Представлены результаты исследования распределения остаточных напряжений по поверхности лопаток двумя способами.

Ключевые слова: *поверхностные остаточные напряжения, рентгеновский метод, модуль Юнга, кинетическое инденування.*

Loskutov S., Seidametov S., Shchetinina M. The improvement of the X-ray method for determination of surface residual stresses

The X-ray method for determination of surface residual stresses, based on the known method « $2\theta - \sin^2 \psi$ » was considered. The increase of accuracy of residual stresses measurement by using the Young modulus values of the surface layer of metal sample obtained experimentally by a method of kinetic indentation was proposed. The results of researches of residual stress distribution over the surface of blades in both ways was presented.

Key words: *surface residual stresses, the X-ray method, the Young modulus, the kinetic indentation.*