

Винахід відноситься до іспитової техніки, а саме до визначення фізико-механічних характеристик приповерхневих шарів металевих деталей.

Відомий спосіб визначення фізико-механічних властивостей матеріалів [1], який полягає в тому, що випробовуваний матеріал деформують безперервним вдавлюванням індентора з площею торця, орієнтованого до випробовуваної поверхні, більшою площею поперечного перерізу його протилежного кінця, витягують індентор з матеріалу і визначають роботу, затрачену на витягування, а з її врахуванням - пружну післядію. Основним недоліком такого способу є обмеженість його застосування (індентування відносно м'яких матеріалів). Складність врахування усіх факторів, які впливають на роботу витягування індентора, зокрема врахування роботи сил тертя.

Відомий аналог способу фізико-механічних властивостей матеріалів [2], який полягає в тому, що в ньому впроваджують індентор під навантаженням у матеріал, розвантажують, реєструють діаграму вдавлювання і розвантаження, вимірюють площу відбитку, збільшують навантаження, додатково впроваджують індентор у той же відбиток, розвантажують його і вимірюють площу відбитку, а відповідну характеристику матеріалу визначають з врахуванням додатково виміряної площі відбитку. Основні недоліки такого способу:

1. Похибки, зв'язані з визначенням діаметра відбитку. Контур відбитка, як правило розмите, особливо при використанні сферичного індентора. Це впливає на точність визначення площі відбитка.

2. Похибки, зв'язані з урахуванням жорсткості установки. Необхідність забезпечення високої жорсткості установки для індентування або її врахування в розрахункових формулах обумовлена тим, що вимірюється зближення індентора із зразком і навантаження.

3. Похибки, пов'язані з неточністю співпадання первинного і наступного відбитків. Труднощі влучення точно в первинний відбиток для зняття вторинних діаграм вдавлювання і розвантаження.

Усі ці фактори вносять у виміри фізико-механічних характеристик матеріалів додаткову похибку і знижують точність їх визначення.

В основу пропонованого винаходу поставлено задачу підвищити точність вимірювання, за рахунок зменшення впливу жорсткості вузла навантаження, зменшення впливу конструктивних параметрів системи навантаження при індентуванні і необхідності точного вимірювання глибини або площі відбитку від індентора, спрощення процесу вимірювання за рахунок його автоматизації.

Вирішення цієї задачі досягається тим, що проводять індентування - це є насамперед контактна взаємодія тіл, в результаті якої формується фактична площа дотику. У процесі зміни навантаження на індентор відбувається відповідна зміна площі механічного контакту. Причому, ця площа є характеристикою взаємодії контактуючих тіл уже по самій своїй природі. У методиці кінетичного індентування основними параметрами є навантаження на індентор, глибина вдавлювання, час випробувань.

Основна похибка експерименту при цьому визначається виміром глибини впровадження індентора і жорсткістю самої установки для індентування. Вимірювання фізичної величини, яка залежить в основному від зміни площі контакту, дозволяє зменшити вплив конструктивних параметрів системи навантаження при індентуванні і необхідності точного вимірювання глибини вдавлювання індентора. Такою величиною є R - контактний електричний опір (КЕО) пари індентор - зразок.

Для вимірювання електричного контактного опору застосовується міст постійного струму Р3009, який увімкнений за схемою подвійного моста МД-2. Для обробки експериментальних даних іспитів на індентування була складена програма "INDENTOR". Програма реалізована мовою Turbo Pascal 7.0 із застосуванням об'єктно-орієнтованого програмування і призначена для роботи в середовищі MS-DOS.

З рішення задачі Герца для пружного зіткнення двох тіл [3] можна одержати формулу для зближення при пружній деформації (індекс "р" приписується величинам, які вимірюються при розвантаженні пари зразок індентор) під час розвантаження контактуючих тіл у вигляді

$$h_p = \pi^{1/2} D \sigma^{-1/2} P^{1/2} \quad (1)$$

Тут P - навантаження; σ - середня контактна напруга; D - модуль контактної пружності, який визначається у вигляді

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

де μ, μ_i, E, E_i - коефіцієнти Пуассона і модулі Юнга зразка і індентора відповідно.

Формулу для зближення при пружно-пластичній деформації, представимо у виді [4]:

$$h_n = 2P / \pi C^2 g \sigma, \quad (3)$$

де коефіцієнт $C = 1.98$; g - радіус індентора.

На підставі обернено пропорційної залежності КЕО і фактичної площі контакту (ФПК) [5] тіл, що взаємодіють, були отримані наступні вирази для пружної (при розвантаженні)

$$\beta / R_p = 2\pi^{3/2} \alpha D g \sigma^{1/2} P^{1/2}, \quad (4)$$

і для пружно-пластичної (при навантаженні) деформації

$$\beta / R_n = 4\alpha P / C^2 \sigma. \quad (5)$$

Тут β - коефіцієнт взаємозв'язку ФПК і КЕО; α - відношення фактичної до контурної площі контакту.

Вирази (4) і (5) дозволяють визначити пружні константи металів при іспитах на кінетичне індентування з вимірюванням КЕО. Для цього необхідно провести тарувальні виміри на зразку з відомими модулями пружності й обчислити відношення β / α :

$$\frac{\beta}{\alpha} = 2\sqrt{\pi^{3/2} D g} / \sqrt{C \frac{d(1/R_p)}{dP_p^{1/2}} \frac{d(1/R_n)}{dP_n}} \quad (6)$$

Експериментально вимірюючи модуль контактної пружності для зразка і індентора

$$D_s = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^{\frac{3}{2}} C \frac{d(1/R_p)}{dP_p^{1/2}} \frac{d(1/R_H)}{dP_H} \frac{1}{4\pi^2 r^{\frac{3}{2}}} \quad (7)$$

і використовуючи табличні значення модуля Юнга та коефіцієнта Пуассона індентора, можна визначити модуль Юнга зразка.

$$E_s = \frac{1 - \mu_s^2}{4 \frac{D_s}{3} - \frac{1 - \mu_i^2}{E_i}} \quad (8)$$

При цьому враховуючи слабу залежність коефіцієнта Пуассона від виду зміцнюючої поверхневої обробки зразка приймається його табличне значення.

Для кінетичної твердості, як середньої напруги на поверхні сферичного відбитку, як при навантаженні так і при розвантаженні, можна одержати:

$$H = \sigma = P \alpha R / \beta \quad (9)$$

За міру контактної деформації при навантаженні приймемо

$$\varepsilon = \frac{2\pi r h - \pi r^2}{\pi r^2} = \frac{1}{1 - \frac{h}{2r}} - 1 \quad \text{або}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{P \frac{\beta d(1/R_H)}{\alpha dP_H}} - 1, \quad (10)$$

де ρ - радіус відбитку. Тоді величину активаційного об'єму можна оцінити, застосувавши формулу

$$V^* = 12kT \left(\frac{\partial \lg \varepsilon}{\partial H} \right)_T \quad (11)$$

Тарувальні іспити на індентування проводилися на монокристалічному ніобії в напрямку [100], потім були визначені модулі Юнга зразків із сплаву на основі титана марки ВТЗ-1 з різними видами поверхневої зміцнюючої обробки.

У приведеній нижче таблиці представлені результати рентгенодифрактометричного визначення залишкових макронапруг, а значення модуля Юнга та активаційного об'єму отримані на основі розробленої методики кінетичного індентування.

Таблиця

Середні значення фізико-механічні характеристики
приповерхневого шару зразків із сплаву ВТЗ-1 після
різних видів поверхневої обробки

Позначення серії зразків	Модуль Юнга, Е, ГПа	Залишкові макронапруги, МПа	Активаційний об'єм, V^* , $10^{-28}, \text{м}^3$
А	118	-594	4.99
В	90	-460	6.02
С	99	-200	8.41

Примітка:

А - віброамплітудна шліфівка і поліровка, 30хв.;

В - обробка сталевими кульками діаметром 1,9мм
в ультразвуковому полі, 3хв.;

С - віброамплітудне зміцнення керамічними
гранулами діаметром 1,9мм, 15хв.

Із таблиці видно, що одержані прийнятні значення для модуля Юнга сплаву ВТЗ-1 з врахуванням того, що аналізувався тонкий приповерхневий шар з розвинутою дефектною структурою.

Визначені по формулі (11) значення активаційного об'єму зразків із сплаву титана дозволили пояснити структурні зміни в результаті різних поверхневих зміцнюючих обробок. Стискаючі залишкові макронапруги в приповерхньому шарі зразків обумовлені розвитком дислокаційної структури в результаті механічного впливу на поверхню. Як наслідок цього спостерігається кореляція між величиною залишкових напруг і активаційним об'ємом. Росту стискаючих напруг відповідає зменшення величини активаційного об'єму.

Для визначення межі текучості в досліджуваний плоский зразок вдавлюють сферичний індентор з постійною швидкістю навантаження. В процесі вдавлювання вимірюють час, навантаження і контактний електричний опір.

Потім виконують розвантаження зразка, вимірюючи також час, навантаження і контактний електричний опір. Емпірична залежність середньої контактної напруги від деформації контактної області уявляє собою ламану лінію, що складається з двох ділянок (дивись діаграму на кресленні). Кутові коефіцієнти обох ділянок істотно розрізняються. Координата зламу відповідає граничній середній контактній напрузі переходу до макропластичного деформування. Виміряна таким способом гранична контактна напруга визначає межу текучості матеріалу поверхневого шару металу.

По виміряним значенням електричного опору R , навантаження P , і часу, використовуючи формули (9) і (10) визначають середні контактні напруги і відповідні їм деформації контактної зони. Використовуючи метод найменших квадратів, експериментальні залежності першої і другої ділянок апроксимують прямими, перетин яких дає значення граничної середньої контактної напруги. У випадку, представленому на кресленні для зразка із сплаву титана після вакуумного відпалювання при температурі 860°C протягом 3 годин отримано $\sigma_T = 90,6 \cdot 10^7 \text{ Па}$, що узгоджується з табличним значенням.

Джерела інформації

1. А. с. №1244557 СССР, МКИ G01N3/40. Способ определения физико-механических свойств материалов /А.А. Барзов, А.А. Вдовин (СССР). -Опубл. 15.07.86. Бюл. №26.
2. А.с. №1111065 СССР, МКИ G01N3/42. Способ определения физико-механических характеристик материалов /С.И. Булычев, М.Х. Шоршоров, Л.К. Болотова, В.П. Алёхин (СССР). -Опубл. 30.08.84. Бюл. №32.
3. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц Теория упругости. М.: "Наука", 1987, 247с.
4. I.H.Underwood, G.P. O'Hara, I.I. Zaiinka //Experimental Mechanics. 1986 -21, №4 -P.379-385.
5. А. с. №1430820 СССР, МКИ G01N3/56. Способ определения фактической площади касания токопроводящих деталей /В.В. Левитин, С.В. Лоскутов (СССР). -Опубл. 1988. Бюл. №38. -с.184-185.

