Метод Віккерса

Метод Вікерса є одним із універсальних способів вимірювання твердості поверхні різних металів та сплавів. Він, як й інші методи, розраховує здатність опору пластичній деформації, яка здійснюється стандартизованим алмазним наконечником у вигляді чотиригранної піраміди. Цей метод має найширшу шкалу показників для різних типів матеріалів, а тому вважається найуживанішим серед вимірювань твердості.

Історія та розробка методу

Вперше такий метод вимірювання твердості запропонував британський військово-промисловий концерн Віккерс-Армстронг у 1925 році. Розробили його Роберт Л. Сміт та Джордж Е. Сандленд з метою знайти альтернативу методу Брінелля. Ці методи дійсно дуже подібні за принципом вимірювання, формулою обчислення, а також отриманими результатами. Головна їх різниця – матеріал та форма наконечника (алмазна піраміда за Віккерсом дозволила вимірювати твердіші матеріали) та навантаження (метод Віккерса завжди потребує меншої прикладеної сили). Останнє також дозволило за допомогою методу Віккерса вимірювати твердість набагато тонших матеріалів.

Основними вимогами до нового методу було створити геометрично ідентичні відтиски незалежно від розміру з чіткими точками виміру та стійким до самодеформації індентором. Тому концерн і зупинився на алмазі у формі квадратної піраміди як матеріалі для наконечника. Ідеальним розміром відтиску за Бріннелем вважалося 3/8 діаметра кулі. Оскільки дві дотичні на кінцях довгої хорди 3d/8 перетинаються під кутом 136^{o}, дослідники взяли цей показник за величину кута між плоскими гранями наконечника індентора. Таким чином кут від кожної грані нормалі до горизонтальної плоскості нормалі з кожного боку дорівнював 22^{o}. Ряд експериментів визначив, що значення твердості на однорідному матеріалі, незалежно від навантаження, лишалося сталим. Це відбувалося за рахунок закону пропорційних сил спротиву: дослідна сила і поверхня втиснення у методі Віккерса пропорційні одна одній.

Завдяки його точності та впливовості концерну, до 1950 року метод Віккерса швидко став стандартом для вимірювань твердості різних типів металів та їх сплавів у Європі. На популярність також вплинула відносна простота методу: уніфіковані дані тепер не залежали ані від розміру наконечника, ані від типу матеріалу. Окрім того, великі навантаження легко деформували наконечник Брінелля, чого не ставалося із алмазною пірамідою у методі Віккерса.

Стандартизація методу відбулася в Англії у 1931році, за DIN (німецькою системою стандартизації) - 1940 року, у Франції – 1946 року. У 1950 році метод стандартизували у США, а вже за п’ять років був вироблений загальноєвропейський стандарт для методів Брінелля, Віккерса і Роквелла. Міжнародний стандарт ISO для методу Віккерса був сформований 1982 року (для навантажень від 5 до 100 кгс).

З часом метод було поділено на 2 частини залежно від діапазону прикладеної сили. Власне метод Віккерса – це макротест, із навантаженнями від 1 кгс до 100 кгс. Мікротест був названий методом мікро-Віккерса (див. Мікро-Віккерс, інформація оновлюється), він відповідав навантаженню від 10 до 1000 грам. Стандарти ISO для мікро-діапазону

розроблялися пізніше, із 1983 по 1993 роки. Нині метод Віккерса використовується по всьому світу.

Підготування зразка для вимірювання твердості

Випробування твердості за методом Віккерса починається з підготування дослідного зразка, очищення його поверхні тощо. Головна мета підготування зразка – щоб індентор ввійшов у поверхню точно перпендикулярно. Для кращого результату використовується зовнішня фіксація зразка за допомогою приспособ під кутом у 90º до осі наконечника індентора. Ненадійне закріплення може призвести до зміщень зразка при деформації, що суттєво викривить результати.

Поверхня зразка для методу Віккерса має бути відшліфованою до плоскопаралельних торцевих поверхонь - механічне полірування та електрополірування потрібне лише для мікровимірювань. Для металічних поверхонь рекомендованим є використання тонкого наждачного паперу із зернистістю 400. Поверхня також має бути звільнена від окалини, окисної плівки і сторонніх речовин, а також змазуючих засобів, якщо щодо цього немає особливих вказівок у стандартах виробу, оскільки чим чистіша поверхня, тим легше вирізнити межі діагоналей відтиску. За ISO, товщина шару, що знімається, повинна бути не менше 0,2мм. В будь-якому разі під час підготовки поверхні зразка не повинно відбутися такого додаткового нагрівання чи охолодження матеріалу, щоб це вплинуло на подальші показники твердості. Шорсткість поверхні зразка повинна бути не більше за 0,16 мкм. Опорна поверхня, до якої кріпиться зразок, повинна бути також очищена, особливо від ковзких речовин (накипу, маслянистих залишків тощо), аби матеріал не зміщувався під час дії індентора. Для зразків неправильної форми або малого перерізу зазвичай використовують додаткові опори, доки зразок не буде повноцінно зафіксований.

Проведення вимірювання

Вимірювання здійснюється через вдавлення в зразок алмазного наконечника у формі правильної чотиригранної піраміди, під дією визначеного навантаження і впродовж визначеного часу. Після цього вимірюють слід відбитку та вираховують середнє арифметичне значення діагоналей. Вимірювання може здійснюватися на одному і тому ж зразку кілька разів при наявності недеформованих ділянок поверхні. Через геометрію піраміди глибина проникнення індентора зазвичай дорівнює приблизно 1/7 глибини діагоналі.

Температурними умовами вимірювання є 20 (+15 – -10)ºС. Якщо є відмінності в даних, в помірному кліматі температура має становити 20ºС, а в тропічному – 27ºС з допуском у два градуси. Якщо вимірювання проводять в контрольованих умовах, температурним режимом є 23 (± 5)°С.

Можливими навантаженнями (кгс) зазвичай є стандартний ряд: 1; 2; 2,5; 3; 5; 10; 20; 30; 50; 100. Максимальний можливий показник в пристроях - 980,7 HV, що відповідає навантаженню у 100кгс, однак в лабораторних умовах можливо розрахувати твердість

матеріалів із значно більшими показниками HV. Метод Віккерса дозволяє виміряти твердість однорідного матеріалу незалежно від навантаження: дані будуть однаковими для макровимірювання, і до мікровимірювання понад 200 грам (див. Мікро-Віккерс, інформація оновлюється). Величина навантаження завжди залежить від матеріалу – чим він тонший, тем менше навантаження. Зазвичай використовується навантаження в межах 5-12 кгс із часом витримки у 10-15 секунд для чорних металів, і 28-32 секунди для кольорових. Для визначення твердості чорних металів та сплавів використовується навантаження діапазоном 5 - 100 кгс (49,03 - 980,7 Н), для міді та її сплавів – діапазоном 2,5 - 50 кгс (24,52 - 490,3 Н), для алюмінієвих сплавів – 1 – 100 кгс (9,807 - 980,7 Н). Міжнародні стандарти подають звичайними робочими навантаженнями 30кгс для сталей та чугунів, 10кгс для мідних сплавів, 5 кгс для чистої міді та алюмінієвих сплавів, 2,5кгс для чистого алюмінію та 1 кгс для свинцю, олова та олов'яних сплавів.

Навантаження має вводитися плавно (за ISO, від 2 до 8 секунд) до потрібного значення, щоб вберегти зразок від небажаних деформацій. Допуск на витримання часу за стандартами дорівнює ± 2 секунди. Чітке витримування часу здійснюється через автоматичні поршні в машинах для вимірювання твердості. Під час натиску класичною вважається швидкість дотику індентора до поверхні виробу у ≤0,2 мм/с для випробувань з невеликими навантаженнями, і ≤0,070 мм/с для мікроВіккерса. Після проведення навантажень на зовнішній стороні зразка не має бути деформацій.

Для тонких матеріалів похибка при вимірюванні може виникнути через характер підкладки. Зазвичай товщина зразка має бути в 2,5 рази більше за відбиток. Альтернативно глибина відбитку вимірюється за формулою:

$$\frac{\mathrm{d}}{22\sqrt{2}tan\,\theta/2} = h,$$

що приблизно дорівнює h≈d/7,0006. Мінімальна товщина зразка має бути для виробів із сталі більшою за діагональ відтиску у 1,2 рази, для виробів із кольорових металів – в 1,5 рази, хоча для кольорових металів існує окрема номограма із показниками для кожного виду металу. При вимірюванні твердості на криволінійних поверхнях радіус кривизни має бути не менше 5мм, в іншому разі застосовуються окремі поправочні коефіцієнти окремо для циліндричних та сферичних поверхонь.

Якщо товщина випробувального шару невідома, проводиться кілька вимірів при різних навантаженнях. Якщо при цьому показники твердості змінюються, потрібно зменшувати навантаження, доки при двох суміжних навантаженнях показники твердості будуть близькі за своїм значенням чи співпадати.

На вимірювання також має вплив так званий ефект краю, а також загартовані ділянки зразка. Саме тому враховується стандартизована мінімальна відстань між втисненнями та відстань між втисненням та краєм зразка. Стандарт ISO 6507-1 вимагає відстані між втисненнями >3 d для сталі, міді і мідних сплавів, і >6 d для легких металів, свинцю, олова та їх сплавів; стандарт ASTM E384 – 2,5 d. Відстань від центру втиснення до краю зразка матеріалу для сталі та мідних сплавів обидва стандарти подають однаково – 2,5 d. Для легких металів стандарт ASTM E384 подає також 2,5 d, тоді як ISO 6507-1

вказує його у >3 d. У разі, якщо два відбитки є різними за розмірами, відстань між ними має визначатися за середньою довжиною діагоналей більшого виступу.

Мінімальна ширина діагоналі задля чіткого зчитування розміру втиснень повинна дорівнювати 20 мкм. Вимір діагоналей довжиною до 0,2мм здійснюється з похибкою не більш як 0,001мм, для більших діагоналей вираховується максимальна похибка у 0,5% довжини. Також вимірювані діагоналі не мають відхилятися більше ніж на 5% один від одної (для методу Кнуппа, наприклад, відхилення допускаються до 10%) за ISO, хоча інші стандарти можуть вказувати відхилення не більше ніж на 2%. Анізотропні матеріали, які зазнали значної холодної обробки, мають більші відхилення між діагоналями при вимірюванні їх твердості, тому вони вважаються винятками: їх допуски вказані в окремих стандартах чи технічних умовах продукції. Такі вироби краще розміщувати таким чином, щоб діагоналі були орієнтовані в площині під кутом у 45° до напрямку холодної обробки.

Неоднорідні матеріали можуть дати різні показники твердості. Для визначення середніх показників твердості для таких зразків здійснюється від 5 до 10 вимірів.

Прилади для вимірювання твердості за методом Віккерса зазвичай стаціонарні, однак в межа макро-діапазону можливе також виконання їх у вигляді портативних пристроїв. Сучасні прилади можуть поєднувати кілька методів вимірювання твердості (наприклад, Віккерса і Кнуппа для малих навантажень). Навантаження здійснюється за рахунок гідравлічних систем, силою пружини, електромагнітними котушками або безпосередньо діючою масою. Прилади для малих навантажень мають комп'ютерне керування і маси прямої дії, тому раніше їх навіть називали "приладами з власною вагою". В цьому разі маси розташовуються в стопці і мають діапазон від 5 до 1000 грам (від 0,18 до 35 унцій). Відступи вимірюються безпосередньо в приладі, який має рухомий об'єктив, що замінює індентор при повороті, наприклад, на базі револьверної головки. Визначення показників відбитку може проводитися за допомогою вимірювальних окулярів чи мікроскопа. Зазвичай діагональна довжина квадратного відбитку вимірюється за допомогою мікроскопа, який має змінну щілину, вбудовану в окуляр. Ширина щілини регулюється таким чином, щоб її краї співпадали з кутами відбитку та відносною довжиною відбитку. Деякі прилади для вимірювання твердості використовують альтернативну систему, в якій збільшене зображення відтиску проектується на екран, де і вимірюється його розмір або через сітку, виведену на екран, або за іншими спеціальними системами аналізу зображень.

Наконечник для методу Віккерса

Робоча частина наконечника для методу Віккерса є чотирьохгранною пірамідою із 136° між протилежними гранями, при чому за за ISO 6507-2 допустимою похибкою є 136±12°. Кути між протилежними сторонами при перевірці індентора також можуть бути виміряні за кутами між протилежними ребрами, які повинні складати 148,11±0,76°, зміщення – менше 0,5μ. Довжина перемички на вершині алмазної піраміди не повинна перевищувати 0,001мм, оскільки це може суттєво вплинути на результати вимірювання. ISO 6507-2 подає відповідне калібрування: для меж тестувальної сили у $0{,}009807 \leq F \leq$

1,961 максимально допустимою довжиною перемички є 0,0005мм, для проміжку $1{,}961 \leq F \leq 49{,}03 - 0{,}001$мм; для проміжку $F \geq 49{,}03 - 0{,}002$мм.

В наконечниках для методу Віккерса застосовуються природні алмази або MCD найвищої якості. Кристали повинні бути правильної форми, без внутрішньої напруги, дефектів, включень та тріщин (при перевірці із двадцятикратним збільшенням). Висота робочої частини алмазу має бути більшою за 0,30 мм. Кути нахилу граней робочої частини до осі оправи мають дорівнювати 68°±30'. Для оправи наконечника зазвичай використовуються сталі марок 12ХН3А (за класифікацією США – сталь 3415, за англійською системою - 655M13, німецькою - 1.5732, 12Ni14, 14NiCr10, 14NiCr14) та 14Х17Р2, а також інші сталі подібних механічних властивостей.

За стандартом ISO 6507-2 та ISO 6507-3, індентори поділяються на ті, що призначені для щоденного використання, та калібровочні індентори. Вимоги до останніх набагато суворіші: кут між гранями в (136±0,1°), невідповідність осей корпуса та вершини щодо нахилу до осі індентора - $\leq 0{,}3$ (для звичайного індентора - $\leq 0{,}5$), похибка зміщення - $< 0{,}25\mu$, перпендикулярності перетину - $< 0{,}2°$, плоскості граней - $< 0{,}3\mu$. Вимоги ASTM E92-17 ділять індентори на класи A та B, подібно до Роквелла. Вони відрізняються, наприклад, кутом між ребрами - 148,20±0,75° та 148,20±0,11° відповідно. Невідповідність осей корпуса та вершини щодо нахилу до осі індентора – $< 0{,}5°$ і $< 0{,}25°$ відповідно, похибка зміщення - $< 0{,}5\mu$ і $< 0{,}3\mu$.

Алмазні наконечники для методу Віккерса можуть також позначатися як НП (мікроВіккерс - НПМ). Міжнародними стандартами для наконечників для методу Віккерса є ISO 6507-2 та ASTM E92-17.

Обчислення та дані

Число твердості за методом Віккерса є функцією випробувальної сили, поділеної на площу поверхні відступу. Воно вираховується співвідношенням F:A, де F – сила, прикладена до алмазу в кілограмах, A – площа поверхні результуючого вдавлення в квадратних міліметрах. За ДСТУ, твердість за Віккерсом пропорційна результату ділення числового значення величини зусилля на числове значення площі похилої поверхні відбитка, яка є правильною пірамідою з квадратною основою і має кут біля вершини, який дорівнює куту біля вершини індентора.

Виведені формули:

$$A = \frac{d^2}{2\sin(136°/2)},$$

що приблизно зводиться до:

$$A \approx \frac{d^2}{1{,}8544},$$

де d – середня довжина діагоналі, залишеного індентором в міліметрах. Тому й дані при виміру твердості:

$$HV = \frac{F}{A} \approx \frac{1{,}8544\mathrm{F}}{d^2}\ [\text{кгс/мм}^2].$$

Якщо ж прикладається сила у ньютонах, то:

$$HV = \frac{\text{константа x прикладене зусилля}}{\text{площа поверхні відбитка}} = \frac{0{,}102\text{x } 2F\sin 136°/2}{d^2} = \frac{0{,}1891F}{d^2}.$$

Константа в цьому рівнянні дорівнює:

$$\frac{1}{9{,}80665} = 0{,}102,$$

де 9,80665 – стандартизований коефіцієнт переходу від кгс до ньютонів.

У формулах, пов'язаних із методом Віккерса, d – завжди арифметична змінна, що виводиться з показників обох діагоналей. Всі спрощені формули використовують кут α=136º, складніші розрахунки здійснюються з врахуванням фактичного значення кута.

Величина твердості у методі Віккерса позначається символом HV (100 HV), зазвичай вона подається без інших вказівок за умов навантаження у 30 кгс (294,2 Н) і часу витримки в 10-15 секунд. Іншим способом запису є вказування часу (в секундах) та навантаження (в кгс) через скісну риску – 100 HV 10/40. H і V розшифровується відповідно як Hardness (твердість) і Vickers (Віккерс) з англійської. У міжнародній класифікації можливі назви Vickers Pyramid Number (HV) (буквально – число піраміди за Вікерсом), Diamond Pyramid Hardness (DPH) (твердість за алмазною пірамідою), що є буквальним описом того, як здійснюється вимірювання, H_V або H_D (Hardness Diamond), аби відрізняти його від HB чи H_B (Hardness Brinell). Стандартними є показники діаманту – 10000HV, та мартензиту - 1000 HV. Для порівняння, твердість чистого заліза приблизно дорівнює 60 HV, а спечених карбідів – близько 2000 HV.

Дані в обчисленні HV не дорівнюють ***фізичному тиску***. Щоб відобразити показники в системі SI, потрібно перевести силу в ньютонах до сили у кілограмах через ділення на 9,80665 (стандартні показники гравітації). Для цього використовується подана вище формула $HV \approx 0{,}1891\ F/d^2$ [$Н/мм^2$] з виміром F в ньютонах, однак вона не є кінцевою (все ще показує твердість за Віккерсом). Для уніфікації показників твердості за системою SI, потрібно врахувати значення твердості в кілограмах на квадратний міліметр ($кгс/мм^2$), щоб отримати твердіть в МПа ($Н/мм^2$), а потім поділити на 1000, щоб перевести в ГПа. Стандарт ISO 6507 при часі виміру в 10-15 секунд співвідносить межі 10гс-100кгс як 0,0981-9,807 Н, а стандарт ASTM E384 для меж у 1гс - ≤1кгс дає рамки в 0,0098 - ≤9,807 Н, а діапазон >1кгс - ≤120кгс відповідно дорівнює >9,807- ≤1176,800 Н.

Подекуди використовують також позначення **розмаху значень HV**, ΔHV. Це число показує інтервал між найбільшим і найменшим значенням твердості HV, отриманими при вимірюванні твердості в ряді точок (стандартно – п'яти), розташованих рівномірно на поверхні міри твердості за шкалою Віккерса. Залежно від показників розмаху визначають розряд міри твердості (1 та 2, або просто вищий та нижчий). Такі показники залежать від типу міри твердості, і зазвичай для методу Віккерсу складають близько 3 та 5% для діапазону навантажень у 1-2 кгс (відповідно, для мір вищого та нижчого розряду), 1,5 та 3 – для інтервалу навантажень у 5-10кгс, та 1 і 2% для інтервалу від 20 до 100кгс. Існують також детальніші таблиці даних ΔHV.

В лабораторних дослідженнях також можливо розрахувати **дійсну площу відступу**. Хоча зазвичай прийнято брати за зразок відступу форму квадрату, насправді ця форма

залежить від матеріалу. Матеріали із попередньою температурною обробкою, наприклад, мають здатність до опускання поверхні навколо відступу (вігнутої форми), а тому їх реальна площа контакту виявляється меншою порівняно із квадратним відступом за теорією. Інші показники мають раніше деформовані метали, оскільки їх форма відтиску більш випукла, з більшою площею порівняно із квадратом із такими ж діагоналями. Це пояснюється передусім тим, що в кутах та між кутами реальний тиск може відрізнятися залежно від опору, спричиненого загартованим чи незагартованим матеріалом.

За HV також можна розрахувати ***міцність на розрив***. Якщо HV прописується в кгс/мм^2, то міцність на розрив (в МПа):

$$\sigma u \approx \frac{HV}{c} \approx \frac{HV}{3},$$

де с - константа, що визначає міцність текучості, коефіцієнт Пуассона, показник загартовування та геометричні коефіцієнти, що зазвичай коливаються між 2 і 4. Цей емпіричний закон може змінюватися залежно від загартовування матеріалу.

Звіт про випробування зазвичай повинен містити таку інформацію:

а) посилання на стандарти, яких дотримувалися при випробуваннях;

б) всю інформацію, необхідну для ідентифікації досліджуваного зразка;

в) дату випробування;

г) результат твердості, отриманий у HV;

д) усі побічні операції, що проводилися із зразком;

е) деталі будь-яких обставин, що вплинули на результати;

є) температуру випробування, якщо вона виходить за межі стандартної;

ж) там, де також проводиться перетворення на іншу шкалу твердості, - основу та спосіб цього перетворення.

Застосування методу Віккерса

Метод Віккерса використовується для вимірювання твердості:

- деталей малої товщини,
- тонколистових загартованих та незагартованих сталей,
- тонких шарів із високою твердістю,
- поверхонь із гальванічним покриттям,
- цинкованих, хромованих і луджених поверхонь,
- азотованих та цементованих поверхонь,
- валків для холодної прокатки.

Метод дійсний як для чорних, так і для кольорових металів та сплавів. Особливо важливе його застосування для вимірювання твердості сталі, адже він показує, чи була стальна поверхня випадково вуглецьована чи зневуглецьована в ході термічної обробки.

"ІНСТРУМЕНТСЕРВІС"

Власне, якщо твердість при низькому навантаженні значно нижча від твердості при високому навантаженні, тобто при великих навантаженнях індентор проникає набагато глибше в матеріал, виявляється зневуглецьовування.

Метод Віккерса зручний для вимірювання твердості дуже твердих сполук, наприклад, боридів металів, твердість яких варіюється від 1600 до 2000 HV. У виробництві скла методом Віккерса може бути вирахувана здатність скла до ерозії та деформації. В лабораторних умовах наконечники Віккерса використовуються також для інших типів досліджень, наприклад, група японських вчених Takahashi, M., Ueda, S., і Kurobe, T. використала такі індентори різних розмірів у 1993 році для досліджень щодо швидкостей різьби по склу, впливу вібрації, температури тощо.

Наконечники для методу Віккерса використовуються також для особливого типу випробувань UCI (Ultrasonic Contact Impedance). Під час таких випробувань стержень, що коливається на ультразвуковій частоті з індентором Віккерса на його нижньому кінці, притискається до зразка з певною випробувальною силою. Резонансна частота збільшується, як тільки індентор входить в контакт із зразком, її зміщення фіксується та зв'язується із показником твердості за методом Віккерса.

Метод Віккерса може використовуватися також для вимірювання глибини твердості сталей із загартованою поверхнею, твердості зварних швів та Джоміні-тесту (метод торцевого загартовування для визначення прогартовуваності сталі).

Для вимірювання глибини твердості сталей із загартованою поверхнею здійснюється серія відтисків від краю зразка в поперечному перерізі до центру. Прогрессія твердості від країв до центру наноситься на графік і вимірюється показник CHD – відстань від поверхні до межі твердості (HL). Є кілька способів вимірювання CHD із стандартизованими показниками.

1. Для карбонованих або карбонітрованих сталей HL=550HV, тому CHD вимірюється відстанню від поверхні до точки, де твердість зрівнюється із 550HV.
2. Для індукційних та вогнетривких сталей HL=80% x мінімальна твердість поверхні. Таким чином CHD є відстанню від поверхні до точки, де твердість становить 80% від мінімальної твердості поверхні.
3. Для азотованих зразків HL=твердість сердечника + 50HV. Тоді CHD визначається як максимальна відстань від поверхні до точки, де твердість перевищує твердість сердечника на 50 HV.

Важливо, що для проведення таких вимірювань повинна бути дотримана не менш як 2,5-кратна відстань середньої довжини діагоналі між відтисками.

Для проведення тесту Джоміні (визначення прогартовуваності сталі) здійснюється нагрів циліндричного стального зразка до температури аустенізації (від 980 до 1010ºС) і охолодження з одного боку контрольованою подачею води. Потім твердість вимірюється на загартованому кінці і далі впродовж зразка із визначеними інтервалами. Таким чином визначається рівень мікроструктурних змін в залежності від зменшення швидкості охолодження із зростанням відстані від загартованого краю. Чим твердіший матеріал на заданій відстані від загартованого кінця, тим вищою є прогартовуваність сталі. Тестовим методом є HRC або HV30, адже в залежності від стандартів тест Джоміні може

здайснюватися методом Віккерса чи Роквелла. Стандартами тесту є ASTM A255, ISO 642, DIN 50191 та BS 4437.

Тестування зварних швів є оцінкою міцності зварного шва, особливо – навколо зони термічного впливу. Співвідношення твердості всередині і навколо зони термічного впливу визначає ламкість зварного шва. Тестування можна проводити на будь-якій установці для мікротвердості Віккерса. Зазвичай використовуються методи HV5 і HV10. Прогресія показників твердості від краю зразка або верхньої частини шва і далі наноситься на графік із шаблонними інтервалами. Стандартом тесту є ISO 9015 1-2.

Вимірювання твердості алмазів методом Віккерса

Попри те, що є загальне стале число для твердості діаманту (10000 HV), в наукових цілях можливе використання методу Віккерса для вимірювання твердості алмазів (зазвичай синтетичних). Наприклад, при однаковому вимірюванні полікристалічний та монокристалічний алмаз можуть мати показники в 7800 та 8000 HV, із звичайною тенденцією в більшій твердості для монокристалічних утворень. Такі дослідження поєднуються з атомно-силовою мікроскопією, силовою мікроскопією із зондом Кельвіна тощо. Обробка даних є проблемною через те, що відтиски Віккерса в алмазі не мають чітких меж, наконечник після кількох випробувань пошкоджується із зміною геометрії, а сам алмаз - розтріскується. З наукової точки зору дослідження цікаве тим, що в заглибленні алмазу формується нова в'язка субстанція, невпорядкований графіт, що виник через тиск. Твердість в такому разі вимірюється через спроектовану площу контакту графітового шару. Таким чином можна порівняти різні типи синтезованих алмазів, наприклад, монокристали чи CBN і синтезовані алмази прямою конверсією графіту та графітоподібного BN під великим тиском та температурою. Можливо також визначити початкову стадію пластичності матеріалу та орієнтацію ліній ковзання CBN (при впливі температурою та витравкою). Подібні дослідження, наприклад, показують вищу твердість природних алмазів порівняно із деякими видами синтетичних через підвищену концентрацію азоту в останніх, а твердість монокристалів CBN – нижчою за твердість нанополікристалічного CBN, як і здатність опиратися розтріскуванню.

Примітка. Детальніший опис одного з таких досліджень є у статті Dub S., Lytvyn P., Strelchuk V., Nikolenko A., Stubrov Y., Petrusha I., Ivakhnenko S., Takashi Taniguchi. Vickers Hardness of Diamond and cBN Single Crystals: AFM Approach / Sergey Dub. // Crystals. – 2017. – №7.

Контрольні перевірки

Візуальну перевірку потрібно здійснювати перед кожним вимірюванням твердості, оскільки будь-які відхилення можуть вплинути на результати. Поршень, в якому кріпиться індентор, повинен вільно ковзати, без надмірного тертя чи надмірного бічного відхилення. Тримач індентора повинен міцно і непорушно фіксувати індентор, кут між вершиною алмазної піраміди і вершиною тримача індентора повинен бути менший за $0{,}5^{o}$. Впроваджене навантаження не повинне викликати вібрації та струси. Мікроскоп, якщо він присутній у приладі, повинен бути налаштований по центру відтиску, із задовільною якістю підсвітки.

Щодо прикладеної сили, то її похибка перевіряється відповідно до формули:

$$F_{rel} = \frac{F - F_{RS}}{F_{RS} \times 100},$$

де F – вимірювана тестувальна сила, а F_{RS} - номінальна тестувальна сила. Індентор під час перевірки прикладеної сили повинен рухатися так само, як і під час безпосереднього вимірювання твердості. Відхилення тестувальної сили (F_{rel}) для проміжку $0{,}009807 \leq F_{RS} \leq 0{,}09807$ повинне бути в $\pm 2{,}0\% F$, для проміжку $0{,}09807 \leq F_{RS} \leq 1{,}961$ – $\pm 1{,}5\% F$; для проміжку $F_{RS} \geq 1{,}961$ - $\pm 1{,}0\% F$.

Для уточнення результатів також проводяться постійні контрольні перевірки твердості. Для цього слід вибрати контрольний блок твердості (CRM), який калібрується відповідно до стандартів (наприклад, ISO 6507-3) на приблизному рівні твердості, на якому буде використовуватися вимірювання. Він має бути не тонший за 5мм, з тестовою поверхнею не більшою за 40см^2, ненамагнічений (якщо блок виконується зі сталі, він повинен бути демагнітизований), без тріщин, слідів корозії, темних плям, раковин, подряпин та інших пошкоджень. Перевірка проводиться із щонайменше трьома різними позиціями поршня. Зовнішні умови для проведення контролю твердості – обладнане приміщення, що виключає вібрацію та струси, температура повітря 23 ± 5^{o}C, вологість - $65 \pm 15\%$. Перед калібруванням усі столики, індентори та поверхні мір твердості мають бути обезжирені і ретельно витерті.

Перед тим, як проводити періодичну перевірку, діагональну систему вимірювання слід опосередковано перевірити за допомогою одного з опорних відступів на еталонному блоці твердості. Виміряна довжина відступу повинна відповідати сертифікованому значенню в межах більше 0,001 мм або 1,25% від довжини відступу. Якщо дані не співпадають, може бути виміряний другий опорний відступ. Якщо діагональна вимірювальна система не виконає цього другого випробування, діагональну вимірювальну систему слід відрегулювати або відремонтувати, та пройти пряму та опосередковану перевірку відповідно до стандартів.

Щонайменше два вимірювання твердості повинні бути виконані на каліброваній поверхні опорного блоку твердості. Відступи повинні бути рівномірно розподілені на поверхні опорного блоку. Механізм для вимірювання твердості вважається задовільним, якщо максимальне додатне або негативне відсоткове зміщення для кожного вимірювання не перевищує межі, наведені в стандартах: при середній довжині діагоналі в $0{,}02 \leq d \leq 0{,}14$ максимальне допустиме зміщення дорівнює $0{,}21/d + 1{,}5$ [$\pm\%HV$], а при довжині діагоналі в $0{,}14 \leq d \leq 1{,}400$ воно має складати щонайбільше 3[$\pm\%HV$].

Відсоткове зміщення обчислюється відповідно до формули:

$$b = \frac{H - H_{CRM}}{H_{CRM} \times 100},$$

де H - значення твердості, яке відповідає вимірюванню твердості, а H_{CRM} - сертифікована твердість використовуваного опорного блоку. Якщо випробувальна машина не виконала цього випробування, слід переконатися, що індентор та випробувальна машина справні, та повторити періодичну перевірку. Якщо досягти

бажаного результату не вдається, слід звернутися до непрямих перевірок, описаних в стандартах, і усунути несправності. Існують також методики розрахування похибки без систематичності та із систематичною похибкою (М1 і М2), зразки їх обчислення та межі розміщені в стандартах, наприклад, в ДСТУ ISO 6507-1:2007.

Особливим видом контролю є робота з мірами твердості та **динамічними твердомірами**, які вимірюють твердість методом відскоку. В такому разі міри твердості дуже щільно фіксуються на дуже міцній і гладенькій основі, наприклад, спеціальних чугунних плитах. Маса основи має гарантувати відсутність вібрації при ударі. В таких видах контролю між поверхнями, що з'єднують, наноситься негуста консистентна змазка, контактна рідина або інші види контактної змазки. Заборонено використовувати в цьому разі додаткові зажими чи приспособи, адже вони викривлять загальну картину. Мінімальна відстань між сусідніми відтисками має бути 3 мм, центром відтиску і краю поверхні виробу – 5 мм.

Рекомендації щодо перевірки інденторів Віккерса

Вже протягом короткого часу експлуатації наконечник може зазнати небажаних деформацій, невеликих тріщин або інших вад поверхні. Їх вчасне виявлення важливе тим, що проігноровані тріщини чи надщерблення більшають при подальшій роботі. Відремонтовані індентори мають також перевірятися за стандартами перед відновленням роботи.

Передусім алмазна піраміда оглядається на відсутність дефектів та тріщин перед початком використання індентора. Потім на ній вимірюється необхідний кут - максимально допустима похибка вимірювального приладу при цьому дорівнює 0,07°. Калібровка інденторів проводиться з допомогою вимірювальних мікроскопів, проекційних екранів, профілометрів, диференціальних конфокальних мікроскопів, нановимірювальних пристроїв або оптичних інтерферометрів. В останньому випадку калібровка здійснюється боковою поверхнею піраміди, яка регулюється так, щоб не було видно ніяких інтерференційних кілець. Далі так само налаштовується наступна бокова поверхня. Інтерферометр в цьому разі важливий тим, що дозволяє помітити будь-які дефекти країв, поверхні і відхилення в рівності більш як на 0,3 мкм. Так само інтерферометри дозволяють виміряти кут нахилу індентора і кутову різницю між віссю індентора і віссю тримача. Зазвичай похибка при такому вимірюванні головного кута між протилежними сторонами дорівнює $\pm 0{,}02^{\circ}$.

Обчислення перемички та відхилення від форми ідеальної піраміди неможливо побачити в звичайному світловому мікроскопі, тому калібровка для цього здійснюється в скануючому мікроскопі AFM (інша назва – "атомно-силовий мікроскоп"), як і будь-які інші перевірки вершини індентора. Для детальніших стандартів для наконечників див. Наконечник для методу Віккерса.

Переваги та недоліки методу Віккерса

Перевагою методу є його універсальність – широкий спектр показників для різних поверхонь, один тип наконечника, однакова геометрична форма відбитку та відносно

простий спосіб вимірювання. Як результат лінійного і ледь похилого розподілу напруження, частина матеріалу, що піддалася загальній деформації, значно менша у випадку вимірювання твердості за методом Віккерса, ніж за методом Брінелля. Через це метод можна застосовувати на зразках різних розмірів, із різною товщиною та твердістю, з мінімальним пошкодженням поверхні виробу. Наконечники Віккерса також мають перевагу над Брінеллевими для вимірювання твердих матеріалів через свою стійкість: кульки в інденторах Брінелля значно легше деформуються, аніж алмазні піраміди. Навіть якщо деформації Брінеллевої кульки незначні, вони можуть вплинути на дані твердості, і дані за Віккерсом будуть достовірніші. Тому зразки з показниками твердості понад 470 HV (приблизно 446 HB за Брінеллем) рекомендовано перевіряти інденторами Віккерса або Роквелла типу C (HRC).

Недоліком є потреба в детальній підготовці поверхні та велика залежність від глибини впровадження індентора в поверхню, а також час, витрачений на підготовку зразка, вимірювання та обчислення результатів. Наконечник Віккерса не деформує поверхню так сильно, як деякі інші методи вимірювання твердості (наприклад, метод Брінелля), але все ж проникає в неї вдвічі глибше, ніж наконечник Кнуппа. Ще одним недоліком є оптичний спосіб виміру розміру втиснення. Для цього потрібно, щоб кінцеві точки діагоналей мали чітку межу, чого не завжди вдається досягти. Невеликі втиснення мають похибку через те, що може порушитися закон сил пропорційного спротиву через силу поверхневого натягу. Метод Віккерса потребує постійного захисту від зовнішнього впливу та вібрацій, адже це суттєво впливає на результати.

Окрім того, метод Віккерса складний для використання на дуже крихких матеріалах (різні види скла та кераміки), адже втиснення алмазної піраміди призводить до розтріскування, якщо утворення тріщин не є самоціллю дослідження. Дуже тонкі та вузькі зразки також обмежуються у вимірюванні за стандартами методу.

Стандарти

Стандартом для вимірювання твердості за методом Віккерса є ДСТУ ISO 6507-1:2007, ISO 6507 (раніше - BS 427), ASTM E384 (від 10гс до 1 кгс), ASTM E92 (від 1 кгс до 100кгс) та JIS Z 2244. Також використовується ГОСТ 2999.

"ІНСТРУМЕНТСЕРВІС"