

Секція 2

«Сучасні тенденції розвитку технологій»

УДК 620.178.1

МЕТОД БРІНЕЛЛЯ З ФИЗИЧНОЇ ТОЧКИ ЗОРУ

В.І. Мощенок

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет
moshenok@gmail.com*

Метод Брінелля є одним із фундаментальних і історично перших стандартизованих способів визначення твердості металів. Його класична концепція базується на вимірюванні геометричних параметрів залишкового відбитка, що утворюється після вдавлювання твердосплавної кульки в поверхню матеріалу під заданим навантаженням протягом регламентованого часу. Метод належить до групи методів відновленого відбитка, тобто твердість визначається за параметрами залишкової пластичної деформації без урахування пружної складової.

Стандартизація методу регламентується міжнародним стандартом ISO 6506-1 [1], який встановлює вимоги до індентора, навантаження, тривалості витримки, підготовки зразків, точності вимірювань та правил оформлення результатів.

Фізична сутність методу полягає у визначенні опору матеріалу пластичному проникненню сферичного індентора. Під дією навантаження в зоні контакту формується складний об'ємний напружено-деформований стан, що включає локальну пластичну деформацію, об'ємне стискання матеріалу, розвиток зон зсуву та часткове пружне відновлення після зняття навантаження. Оскільки вимірювання проводиться після розвантаження, метод фіксує лише пластичну складову деформації. Саме ця особливість визначає його належність до методів відновленого відбитка.

У класичному виконанні застосовуються виключно твердосплавні кульки з карбїду вольфраму. Стандартні діаметри індентора становлять 10 мм, 5 мм, 2,5 мм і 1 мм. Використання інших геометрій або матеріалів індентора в рамках класичного методу не допускається. Навантаження підбирається пропорційно квадрату діаметра кульки з метою забезпечення геометричної подібності відбитків. При вимірюванні твердості сталі для кульки діаметром 10 мм типовим є навантаження 3000 кгс; для 5 мм - 750 кгс; для 2,5 мм - 187,5 кгс; для 1 мм - 30 кгс. Час витримки під навантаженням зазвичай становить 10–15 секунд для сталей і до 30 секунд для м'яких металів.

Підготовка зразка є критично важливою для забезпечення достовірності результатів. Поверхня повинна бути плоскою, очищеною від окалини та забруднень, без значної шорсткості та з достатньою товщиною

матеріалу - не менше ніж у вісім–десять разів більшою за глибину відбитка. Недотримання цих вимог призводить до систематичних похибок і викривлення результатів.

Процедура випробування передбачає встановлення кульки перпендикулярно до поверхні зразка, плавне прикладання навантаження без ударних впливів, витримку під навантаженням протягом установленого часу та подальше розвантаження. Після зняття навантаження вимірюється діаметр залишкового відбитка у двох взаємно перпендикулярних напрямках. За результат вимірювання приймається середнє арифметичне значення.

Число твердості за Брінеллем визначається як відношення прикладеного навантаження до площі поверхні сферичного сегмента відбитка. Фізично результат має розмірність напруження, хоча традиційно одиниця вимірювання не зазначається. Правильний запис результату включає число твердості та параметри випробування, наприклад: 280 HBW 5/750/10, де 5 - діаметр кульки в міліметрах, 750 - навантаження в кгс, 10 - час витримки у секундах.

Геометрія відбитка має форму сферичного сегмента. Його розміри залежать від модуля пружності матеріалу, межі текучості, ступеня деформаційного зміцнення та умов прикладання навантаження. Оптимальним вважається співвідношення діаметра відбитка до діаметра кульки в межах 0,24–0,6. При надто малих відбитках зростає відносна похибка вимірювання, при надто великих - порушується умова геометричної подібності та зростає вплив краєвих ефектів.

Метод Брінелля широко застосовується для контролю сталей середньої та низької твердості, чавунів, кольорових металів, литих заготовок і масивних деталей машин. Особливо ефективним він є при дослідженні матеріалів з неоднорідною структурою, оскільки великий діаметр кульки забезпечує усереднення локальних структурних особливостей.

Подальший фізичний аналіз методу Брінелля [2], показує, що класичне число HBW фактично є лише однією з можливих інтерпретацій опору матеріалу проникненню індентора. Якщо розглядати процес індентування з позицій механіки суцільного середовища, стає очевидним, що під сферичним індентором формується просторове поле напружень і деформацій, яке не зводиться лише до геометрії залишкового відбитка. Саме тому доцільно розмежовувати поняття поверхневої, проекційної та об'ємної твердості як трьох фізично відмінних характеристик, що впливають із одного й того самого експерименту.

Поверхнева твердість у методі Брінелля визначається як відношення прикладеного навантаження до дійсної площі контактної поверхні сферичного сегмента, що утворюється після пластичної деформації. Геометрично ця площа відповідає частині поверхні кулі радіуса $R = D/2$, зануреної в матеріал на глибину h . У цьому випадку твердість відображає середній контактний тиск, розподілений по реальній криволінійній поверхні

взаємодії. З фізичної точки зору поверхнева твердість характеризує інтенсивність напруженого стану безпосередньо на межі контакту індентора з матеріалом після завершення пластичної течії. Вона є мірою локального опору зсуву в приповерхневій зоні та безпосередньо пов'язана з граничним станом текучості матеріалу при складному тривісному стиску. Саме ця інтерпретація історично закладена в класичну формулу Брінелля, де площа сферичного сегмента визначається через діаметр відбитка. Однак необхідно враховувати, що після розвантаження частина пружної деформації зникає, і контактна площа дещо зменшується, тому поверхнева твердість фактично описує стан матеріалу в умовах залишкової пластичної деформації.

Проекційна твердість ґрунтується на іншій геометричній інтерпретації - вона визначається як відношення навантаження до площі проекції відбитка на площину поверхні зразка. У випадку сферичного індентора це площа круга діаметром d , виміряного після розвантаження. Такий підхід зводить тривимірну контактну задачу до двовимірної площинної інтерпретації. Фізично проекційна твердість відповідає середньому тиску, приведену до площі перерізу зони пластичної деформації. Вона краще корелює з умовною межею текучості при простому напруженому стані та дозволяє порівнювати результати з іншими методами індентування, де використовується площа проекції (наприклад, у пірамідальних інденторах). У цьому сенсі проекційна твердість є більш універсальною величиною для міжметодичного аналізу. Водночас вона не враховує реальну кривизну контактної поверхні і тому дещо спрощує картину напруженого стану. Її значення зазвичай відрізняється від поверхневої твердості через різницю між площею сферичного сегмента та площею круга його проекції, що особливо помітно при великих відносних глибинах проникнення.

Об'ємна твердість є найбільш фізично обґрунтованою з точки зору енергетичного підходу до деформації. Вона визначається як відношення навантаження до об'єму матеріалу, витісненого або пластично деформованого під індентором. Геометрично цей об'єм відповідає об'єму сферичного сегмента, зануреного в матеріал. Така інтерпретація враховує тривимірний характер пластичної течії та дозволяє оцінити опір матеріалу об'ємному деформуванню. Фізично об'ємна твердість пов'язана з питомою роботою пластичної деформації, оскільки інтегральна робота навантаження при вдавлюванні пропорційна об'єму зони пластичної течії. На відміну від поверхневої та проекційної інтерпретацій, які базуються на площинних параметрах, об'ємна твердість враховує повну просторову геометрію відбитка та краще відображає внутрішній механізм зміцнення матеріалу, включаючи вплив дислокаційної структури, фазових перетворень та локального наклепу.

Порівняльний аналіз показує, що поверхнева твердість є чутливою до стану поверхні та геометричної точності індентора, проекційна - до точності вимірювання діаметра відбитка, а об'ємна - до правильності визначення

глибини проникнення або розрахунку об'єму сегмента. У межах одного й того самого експерименту ці три величини можуть відрізнятися чисельно, але фізично вони описують різні аспекти опору матеріалу пластичній деформації. Поверхнева твердість характеризує контактний тиск на реальній межі взаємодії, проекційна - середній тиск у площині перерізу зони деформації, а об'ємна - інтенсивність опору просторовій пластичній течії.

З точки зору механіки деформування сферичний індентор створює підповерхневу зону тривісного стиску, у якій головні напруження мають різний знак і величину. Максимальні зсувні напруження розташовані на певній глибині під поверхнею, що підтверджує об'ємний характер процесу. Саме тому розгляд лише площинної геометрії відбитка не повністю відображає реальний механізм деформації. Об'ємна твердість дозволяє пов'язати результати індентування з енергетичними характеристиками матеріалу, такими як робота пластичної деформації та здатність до дисипації енергії.

Таким чином, метод Брінелля з фізичної точки зору не обмежується визначенням одного емпіричного числа. Він є експериментальною основою для комплексного аналізу опору матеріалу деформуванню в контактних умовах. Поверхнева, проекційна та об'ємна твердість утворюють ієрархію характеристик, що відображають різні геометричні та фізичні аспекти процесу індентування. Їх комплексне використання дозволяє перейти від традиційного контролю якості до глибшого розуміння механізмів пластичної деформації та зміцнення матеріалів, що особливо актуально для сучасного матеріалознавства та інженерної практики.

Висновки

1. Твердість з фізичної точки зору є узагальненою мірою опору матеріалу локальній пластичній деформації при контактній взаємодії з індентором і чисельно визначається як відношення прикладеної сили до характерного геометричного параметра сформованої лунки. Інакше кажучи, твердість еквівалентна тій силі, яка, будучи прикладеною до індентора, формує на поверхні зразка відбиток одиничного розміру. Таким чином, твердість є не просто емпіричним показником, а інтенсивною механічною характеристикою, що відображає середній контактний опір матеріалу проникненню твердого тіла.
2. Якщо розмір лунки оцінюється через дійсну площу її поверхні (площу контакту сферичного сегмента або іншої геометрії індентора), твердість набуває змісту середнього контактного напруження на реальній межі взаємодії. У цьому випадку формується поняття *поверхневої твердості* з розмірністю N/mm^2 , яка фізично відповідає середньому тиску, розподіленому по криволінійній контактній поверхні після завершення пластичної

деформації. Якщо ж розмір лунки визначається площею її ортогональної проекції на поверхню зразка, отримуємо **проекційну твердість** з тією самою розмірністю N/mm². Вона характеризує середній тиск, приведений до площі поперечного перерізу зони деформації, і є більш зручною для міжметодичного порівняння результатів інденування.

3. Якщо розмір лунки оцінюється через об'єм матеріалу, витісненого або пластично деформованого під індентором, твердість визначається як відношення сили до цього об'єму і має розмірність N/mm³. Така **об'ємна твердість** відображає просторову інтенсивність опору матеріалу пластичному деформуванню та пов'язана з питомою роботою деформації в зоні контакту. Вона враховує тривимірний характер напружено-деформованого стану й забезпечує найбільш повну фізичну інтерпретацію процесу інденування, оскільки описує не лише контактну поверхню, а весь об'єм пластичної течії під індентором.

Література

1. ISO 6506-1:2014(E). Metallic materials - Brinell hardness test - Part 1: Test method. Geneva: International Organization for Standardization (ISO), 2014.
2. Мощенок В. І. Розвиток методу Брінелля для макро-, мікро- та нанодіапазонів: монографія. – MVI KD Independently published, USA, 2025. – 253 с. – ISBN 979-8281000963.
<https://www.amazon.com/dp/B0F62WLPSS>

UDC 620.175.2:669.15

POST-COATING DIFFUSION HARDENING OF DIE-CASTING MOLDS WITH PLASMA- DEPOSITED TIN LAYERS

V.A. Sharagov¹, D.B. Hlushkova², V.O. Saienko²

¹Alecu Russo Balti State University, Balti, Republic of Moldova;

²Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv,
Ukraine

e-mail: vsharagov@gmail.com

In addition to the general requirements [1–7], plasma coatings used to protect copper alloy die-casting molds must meet specific requirements: low thermal conductivity, the ability to withstand thermal changes in an aggressive environment, and high corrosion and scale resistance. Coatings made of refractory compounds, primarily titanium nitride, best meet these requirements [1, 2].