

1. The analysis of the obtained signals made it possible to investigate the drilling process and also to determine the sections of signals for the action of the contact phenomena between the cutting tool and the defects.

Conclusions. According to the results of experimental investigations, an empirical model, that describes the relation of the acoustic emission signal on the area of uncut fibers when drilling samples from CFRP, has been determined..

Keywords: drilling, acoustic emission, carbon fiber.

Надійшла до редакції
10 квітня 2018 року

Рецензовано
28 квітня 2018 року

УДК 621.3

МОДЕЛЮВАННЯ КЕРОВАНОГО РУХУ ІНДЕНТОРА ПРИ ВИМІРЮВАННІ ТВЕРДОСТІ МАТЕРІАЛУ ДЕТАЛІ

Скицюк В. І., Булик М. О., Печонка М. М., Клочко Т. Р., Тимчик Г. С.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: t.klochko@kpi.ua

У статті йдеться про актуальну проблему вимірювання параметрів твердості матеріалу деталей різного призначення, які призначені для роботи в умовах великих навантажень, а також при виготовленні штучних імплантів, що призначені для вживлення у живий організм та функціонування їх протягом дуже тривалого часу. Це створює додаткові вимоги до якості цих деталей.

Розглянуто проблему визначення моменту торкання індентора до поверхні деталі та швидкості руху індентора під час вимірювання твердості та мікротвердості матеріалу деталей. Створено модель перехідного процесу зростання тиску, що утворюється при вимірюванні та залежить від типу навантаження. У подальших дослідженнях доцільно продовжити аналіз руху індентора під час випробування на твердість матеріалів. Для цього у подальшому проаналізуємо модель визначення моменту торкання індентора до поверхні деталі, що впливає на точність вимірювання параметрів твердості матеріалу деталі.

Ключові слова: твердість, мікротвердість, матеріал, деталь, імплант, вимірювання, механічна обробка.

Вступ

Твердість є чи не найбільш вживаним параметром твердих матеріалів, який прямо або посередньо входить до різного роду розрахунків навантажень технологічних об'єктів [1]. Особливо актуальною проблемою точного приладобудування є вимірювання параметрів твердості та мікротвердості деталей, які призначені для роботи в умовах великих навантажень. Окрім того, подібні проблеми актуальні також при виготовленні штучних імплантів, що призначені для вживлення у живий організм, оскільки параметри мікротвердості таких деталей повинні відповідати жорстким умовам експлуатації, а тим самим піддаватись крутним, осьовим навантаженням тощо. Тому створення нових методів і засобів контролю та вимірювання значення мікротвердості є вкрай важливою задачею виготовлення точних деталей широкого призначення. Наразі існують розробки приладів вимірювання значення мікротвердості [2, 3, 4], тим не менш, вони або не призначені для застосування на верстаках, або портативні прилади не витримують необхідної точності.

Постановка задачі

Таким чином, ми маємо необхідність користуватися невизначеними поняттями, але з математичним та дослідним підґрунтям.

В силу цілої низки причин, ми маємо необхідність користуватися не тільки цим поняттям, а і фізико-математичним апаратом, який його супроводжує. Отже, під твердістю розуміється здатність матеріального тіла зберігати свою форму незалежно від потужності дії зовнішніх сил [1]. Але, під твердістю в техніці - називається ступінь піддатливості матеріалу під дією зосередженої сили. У техніці твердість розподіляють на два види – твердість та мікротвердість. Наразі твердість є інтегральна характеристика міцності матеріалу, в той час як мікротвердість - є диференційна величина. Твердість має важливе місце у розрахунках при металообробці. Вимірювання твердості, а особливо мікротвердості, стосується якості визначення режимів різання при механічній обробці деталей. Особливо це стосується таких величин як сили навантаження на різальний інструмент P_x , P_y , P_z , його робочі кути θ , γ , ϕ тощо [5, 6, 7].

Величина твердості застосовується для різних обчислень силових навантажень. Так, наприклад, сили різання визначаються як:

$$\begin{cases} P_z = C_{pz} \cdot t^{xp} \cdot S^{yp} \\ P_y = C_{py} \cdot t^{xp} \cdot S^{yp} \\ P_x = C_{px} \cdot t^{xp} \cdot S^{yp} \end{cases} \quad (1)$$

де C_{pz} , C_{py} , C_{px} – жорсткість системи, яка визначається за допомогою твердості, t^{xp} – глибина різання, S^{yp} – подача.

Зазвичай вважається [6], що складові сил різання можуть бути визначені за виразом:

$$P_i = C_i \cdot t^{k+\frac{m}{2} \cdot \lg \frac{t}{S}} \cdot S^{k+\frac{m}{2} \cdot \lg \frac{S}{t}} \quad (2)$$

де k та m – деякі константи, залежні від параметрів оброблюваного матеріалу та геометричних параметрів різального інструмента. Як наслідок, жоден розрахунок пластичної міцності різальної частини інструмента не обходиться без параметру твердості (HB, HV) [6].

Величина твердості за своїми фізичними засадами виявляється досить невизначеною величиною. В результаті, ми маємо цілу низку методів визначення твердості з досить невизначеним результатом. Основна проблема визначення цього параметру матеріалів є досить широкий діапазон зміни параметрів для будь якого матеріалу. Як наслідок, ми маємо суміш кількох параметрів матеріалу, які тою, чи іншою мірою впливають на кінцевий результат. Такими параметрами є пластичність, твердість та пружність. Отже, як би ми не досліджували визначений матеріал на твердість, ми маємо ці параметри як потенційні складові результату. Якщо ми розглянемо пластичність як технологічний процес, то це за своєю сутністю є руйнуюча технологія, яка не має властивості відновлення первинної форми. У цьому випадку штанга-індентор (будь-якої форми) залишає на поверхні досліджуваного об'єкту відповідні спотворення поверхні. Звісно, що для цього необхідно витратити якусь кількість енергії, яка є прямим або посереднім індикатором ступеню руйнації. Найбільш показовими у цьому погляді є пластикові матеріали (органіка) та деякі метали, та їх сплави (золото, свинець, калій тощо). Наступною за пластичністю є пружність, яка характеризується тим, що об'єкт після дії сили та прогину, поступово відновлює свою форму. Оскільки пружність є перехідною властивістю від твердості до пластичності, то їй притаманні властивості, як одного, так і другого параметру. Наразі поняття пластичності є досить непевне, оскільки є досить залежним від зовнішніх параметрів, таких як температура, сила, хімічна дія тощо. Так, наприклад, у [8] під пластичністю розуміється властивість, протилежна пружності, яка полягає у тому, що після зняття діючих сил, тіло змінює свої розміри та форму залежно від історії навантаження. Нарешті властивість в'язкості – виявляється у тому, що після

ля навантаження тіла, напруги та деформації у ньому змінюються з часом.

Врешті, всі ці властивості, як правило, об'єднані у кожному матеріалі в тому чи іншому ступені. Роз'єднати їх можна лише теоретично, як це робиться, наприклад, у [8], коли деформації вважаються пружними при 0,3 .. 0,5%, а пластичними до 10 .. 20% при руйнуванні. Тому при визначенні твердості присутня дія всіх властивостей матеріалу.

Вимірювання твердості є досить розповсюджена методика випробування матеріалів на придатність до виготовлення деталей або якості отриманого результату. До переваг цієї методики необхідно віднести незначні руйнації поверхні технологічного об'єкту, які не вимагають виокремлення дослідного зразка із загальної маси деталі. Для цього достатньо мати невелику частину поверхні з відносно невеликою шорсткістю. Визначення твердості проводять через виміри відбитка, який залишає за собою індентор під дією каліброваної сили. Вершина індентора виконується у вигляді сталевий кульки, алмазного конусу, піраміди або наконечника визначеної форми.

Методи вимірювання твердості розподіляють на статичні та динамічні. Наразі цей розподіл доволі умовний, оскільки втискання індентора не можна зробити миттєвим або доволі тривалим. Як наслідок, час втискання завжди обумовлюється, оскільки це одна з головних умов отримання певного результату. Ця умова обумовлена тим, що процеси деформації не мають миттєвого характеру і протікають хвилеподібно до повного заспокоєння матеріалу. Отже, навантаження при статичних випробуваннях зростають поступово, до того ж час витримки під навантаженнями повинен відповідати стандартам за визначеною методикою. Тобто, виконується руйнуючий рух за методики торкання з відскоком або симетричний (рис.1) [9]. При цьому враховуємо значення \mathcal{N} – стала часу системи тиску індентора, τ – стала часу досліджуваного матеріалу – швидкість сприйняття зовнішніх навантажень.

На ділянці від старту до t – навантаження поступово зростає до регламентованого; з часу t_1 до t_2 – навантаження утримується сталим. При цьому, на третій ділянці швидкість виходу з торкання індентора може бути синхронно із затримкою деформації або швидше. При використанні методики з відскоком є можливість гарантованого швидкісного виходу, тобто:

$$t_1 > t_3 - t_2 \quad (3)$$

При використанні симетричного способу торкання, при замалих швидкостей такого виходу неможливо виконати, а при великих воно поступово буде наближатися до ударного визначення твердості тобто динамічного.

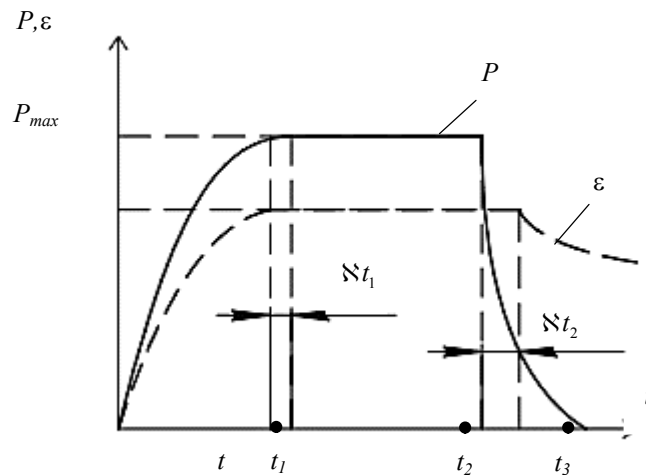


Рис.1. Методика визначення твердості зразка; діаграма силового навантаження

Отже, попри наявності досить сильної залежності від швидкості руху, результат вимірювання досить невизначено трактує цей необхідний параметр. Для інтервалу навантаження t_1 (рис. 1) цей параметр коливається від 10 до 40 секунд, в залежності від обраної методики. Час витримки $t_2 - t_1$ до 200 с, а час $t_3 - t_2$ взагалі не регламентується. При маркуванні твердості, тим не менш, вказується час витримки від t_1 до t_2 . Отже, першу проблему визначення моменту торкання та швидкості руху інден-тора вирішено.

Процес безпосереднього торкання інден-тора поверхню деталі у сучасній технології приладобудування реєструється за самим фактором наявності торкання без попередньої обробки інформації щодо наближення [10]. Зустрічаються лише поодинокі випадки застосування простих систем реєстрації наближення об'єктів один до одного. Оскільки це не задовольняє технологічні потреби виробництва, з погляду точності та надійності, був вироблений обхідний шлях. Сутність його полягала в тому, щоб пом'якшити жорсткий контакт об'єктів, котрий може призвести до руйнування інден-тора та деталі. Оскільки основною метою торкання є визначення координати поверхні за даними про момент торкання, то як наслідок було підвищення швидкодії системи чутника. Поверхня тіл торкання у цьому випадку зберігалась досить надійно, але система мала вади.

Кінематика руху інден-тора під час вимірювання твердості

Для того, щоб повністю визначитися із задачею дослідження, розглянемо спочатку первинні ідеалізовані рухи інден-тора за вимірювання твердості. Оскільки існує декілька варіантів входження об'єктів у торкання, які дають різні можливості з точності, то надалі вони розглядаються згідно їхніх можливостей. Найперший і найменш складний випадок «торкання» відображено на (рис. 2): інден-

тор та зразок є нетвердими тілами, і їх руйнації є суто уявні. Якщо інден-тор рухається до поверхні зразка з швидкістю V_p і між ними виникає торкання, і необхідно зупинити рухоме тіло, то це можливо при виконанні наступних умов.

По-перше, необхідно визначити, чи дійсним є це торкання. Для цього необхідний час $t_{вт}$, за який система повинна визначити дійсність торкання.

По-друге, є необхідним час $t_{рт}$ для прийняття рішення про подальші дії. Якщо існує рішення про зупинку інден-тора, його треба довести до рушійної системи.

Отже, на рис. 2 наведено залежність

$$L_p = V_p (t_T + t_{рт}) + \int_0^{t_{тр}} V_p(t) dt,$$

де L_p - можлива глибина руйнації; V_p - швидкість рухомого тіла інден-тора; t_T - час необхідний для визначення торкання; $t_{рт}$ - час необхідний для прийняття рішення про зупинку; $T_{тр}$ - час гальмування в нерухомому тілі при швидкості V_p .

По-третє, рушійна система, отримавши команду про зупинку, повинна її відпрацювати, на це теж потрібен час для гальмування $T_{тр}$. Якщо вхідна швидкість була V_p , а $V(t)$ є функція швидкості при гальмуванні, то у підсумку отримуємо глибину занурення інден-тора в деталь, або глибину (уявної або реальної) руйнації L_p :

$$L_p = L_T + L_{тр}, \quad (4)$$

де $L_{тр} = \int_0^{t_{тр}} V_p(t) dt$ - розмір шляху до зупинки інден-тора після отримання сигналу зупинки (розгін-гальмування), фактично це глибина занурення інден-тора при вимірюванні твердості;

$L_T = V_p (t_T + t_{рт})$ - розмір шляху, який проходить

індентор до прийняття рішення про зупинку, звідкіля:

$$L_p = l_T + l_{PT}, \quad (5)$$

де l_T – шлях, який проходить індентор для визначення торкання; l_{PT} – шлях, який проходить індентор, поки приймається рішення про зупин.

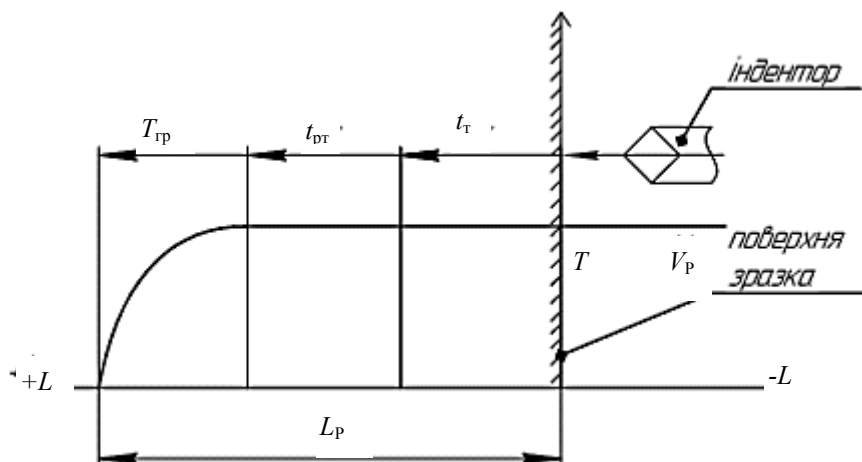


Рис.2. Схема уявної глибини руйнації поверхні зразка та складових

Оскільки функція розгону $f_p(t)$ та гальмування $f_T(t)$ однакові, тобто $f_p(t) = f_T(t) = V(t)$ і виконується для всіх значень V_i , то існує мірило переходу від швидкості V_i , часу t_i та шляху L_{Tp} до іншого. Тобто $V_i = k_i V_p$ та $t_i = k_i T_{Tp}$, де коефіцієнт k_i приймає значення: $1 > k_1 > k_2 > k_3 > \dots > k_i > \dots > k_n > 0$.

Ця умова для l_i частки шляху записується, як:

$$k_i \cdot L_{Tp} = k_i^2 \int_0^{T_{Tp}} V_p(t) dt = k_i^2 \cdot L_{Tp} \quad (6)$$

звідкіля слідує, що існує загальний коефіцієнт k_i для шляху та часу, тобто:

$$l_{Tp_i} = k_i^2 \cdot L_{Tp} = \frac{k_i^2}{2} \cdot V_p \cdot T_{Tp} = \frac{k_i}{\sqrt{2}} \cdot V_p \cdot \frac{k_i}{\sqrt{2}} \cdot T_{Tp} \quad (7)$$

Як доводить аналіз наведеного випадку торкання, головними параметрами будь-якого способу торкання є: глибина руйнації, загальний шлях чутливого елемента при торканні, час, витрачений на цей шлях, похибка отриманої координати. Усі інші параметри цього процесу є сталими у часі.

Моделювання керованого руху індентора

Отже, оскільки процес руху індентора зовсім не нормований стандартами, то розглянемо варіант керованого руху, який дасть можливість визначити момент торкання індентора та поверхні деталі, тобто визначити координату поверхні, і від неї керувати рухом. Необхідно зауважити, що за цією методикою ми маємо можливість визначити момент відліку по всіх координатах, що значно підвищує точність кінцевого результату.

Для цього необхідно розглянути абстрактну ситуацію руху твердого тіла у середині іншого

твердого тіла. Під рухомих тілом мається на увазі індентор, який, просуваючись у масі деталі, розсуває її матеріал обабіч себе. Таким чином, швидкість руху буде мати не ідеалізований характер, а такий, як відображено на рис.1. Оскільки будь-яка реальна система не полишена недоліків, на відміну від уявної, то швидкість зростання тиску не може бути безмежною.

Зростання тиску може відбуватися з кінцевою швидкістю, яка визначається параметрами системи тиску. Отже, щоб дослідити це явище, необхідно задати функцію зростання тиску (рис.3,а). Для початку розглянемо лінійно-зростаючий тиск:

$$P_1(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < 0 \\ \frac{P}{\aleph} t, & \text{при } 0 < t < \aleph \\ -P, & \text{при } t > \Delta \end{cases} \quad (8)$$

Для вирішення нашої задачі скористаємося формулою згортки. Наразі використовуємо прийом, який значно полегшить наші дослідження. Для цього уявимо тиск $P_1(t)$ у вигляді різниці двох необмежено зростаючих функцій $P_{11}(t)$ та $P_{11}(t - \aleph)$, які відрізняються одна від одної лише зсувом у часі (рис. 3,б), де:

$$P_{11}(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < 0 \\ P \cdot t, & \text{при } t > 0 \\ \aleph, & \text{при } t > 0 \end{cases} \quad (9)$$

Як наслідок, нам необхідно знайти реакцію деталі на тиск $P_{11}(t)$. Отже, якщо нам відома ця реакція, досить легко, користуючись принципом накладення, маємо можливість визначити реакцію, що викликається цим тиском, як:

$$P_1(t) = P_{11}(t) - P_{11}(t - \aleph). \quad (10)$$

За формулою згортки реакція від $P_{11}(t)$ визначається як:

$$P_{22}(t) = P_{11}(0) \cdot h(t) + \int_0^t P_{11}'(\xi) \cdot h(t-\xi) d\xi. \quad (11)$$

У виразі (11) величина $h(t)$ позначає перехідну функцію. Оскільки поява миттєвого навантаження викликає первинний тиск $P_2 = P e^{-\frac{t}{\tau}}$, де τ – стала часу системи тиску. Отже, одиничний перепад викликає тиск $h(t) = e^{-\frac{t}{\tau}}$. Таким чином, оскільки

льки $P_{11}'(\xi) = \frac{P}{\aleph}$, а $P_{11}(0) = 0$, то для $t > 0$:

$$P_{22}(t) = \frac{P}{\aleph} e^{-\frac{t}{\tau}} \int_0^t e^{\frac{\xi}{\tau}} d\xi = \frac{\tau P}{\aleph} e^{-\frac{t}{\tau}} \left(e^{\frac{t}{\tau}} - 1 \right) = \frac{\tau P}{\aleph} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (12)$$

тобто експоненційно зростаючий фронт.

Таким чином тиск буде поступово наблизитися до величини:

$$P_{22}(t) = \frac{P}{\aleph} \tau \text{ при } t \gg \aleph. \quad (13)$$

Цілком природно, що цей тиск досягається поступово за експоненційною залежністю, яка визначається сталою часу системи. Таким чином реакція $P_2(t)$ на лінійно-зростаючий тиск $P_1(t)$ (рис. 3,а) визначається наступним чином:

$$P_2(t) = P_{22}(t) - P_{22}(t-\aleph). \quad (14)$$

При $t < 0$, коли $P_{22}(t-\aleph) = 0$:

$$P_2(t) = P_{22}(t) = \frac{\tau P}{\aleph} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right). \quad (15)$$

У випадку $t > 0$, використовуючи (12), отримуємо:

$$P_2(t) = \frac{\tau P}{\aleph} \left[\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) - \left(1 - e^{-\frac{t-\aleph}{\tau}} \right) \right] = \frac{\tau P}{\aleph} \left(e^{-\frac{t-\aleph}{\tau}} - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) = \frac{\tau P}{\aleph} \left(e^{\frac{\aleph}{\tau}} - 1 \right) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Таким чином, ми маємо можливість отримати діаграму зміни тиску, яка складається з двох експонент для випадку $\aleph < \tau$ і $\aleph > \tau$ (рис. 4,а, рис. 4,б).

Отже, максимальне значення амплітуди тиску на виході системи визначиться виразом (16), якщо в нього підставити $t = \aleph$, тобто:

$$P_{zm} = \frac{\tau P}{\aleph} \left(1 - e^{-\frac{\aleph}{\tau}} \right). \quad (17)$$

Для випадку $\aleph \ll \tau$ розкладається $e^{-\frac{\aleph}{\tau}}$ у ряд та обмежується першими двома членами розкладу, отримаємо:

$$P_{zm} \approx P \text{ при } \aleph \ll \tau. \quad (18)$$

Таким чином, за довжиною фронту зростання дуже малою у порівнянні зі сталою системи амплітуда тиску виявляється досить близькою до прикладеного статичного тиску. І навпаки, при $\tau \ll \aleph$, $e^{-\frac{\aleph}{\tau}} \ll 1$, а отже:

$$P_{zm} \approx \frac{\tau P}{\aleph}. \quad (19)$$

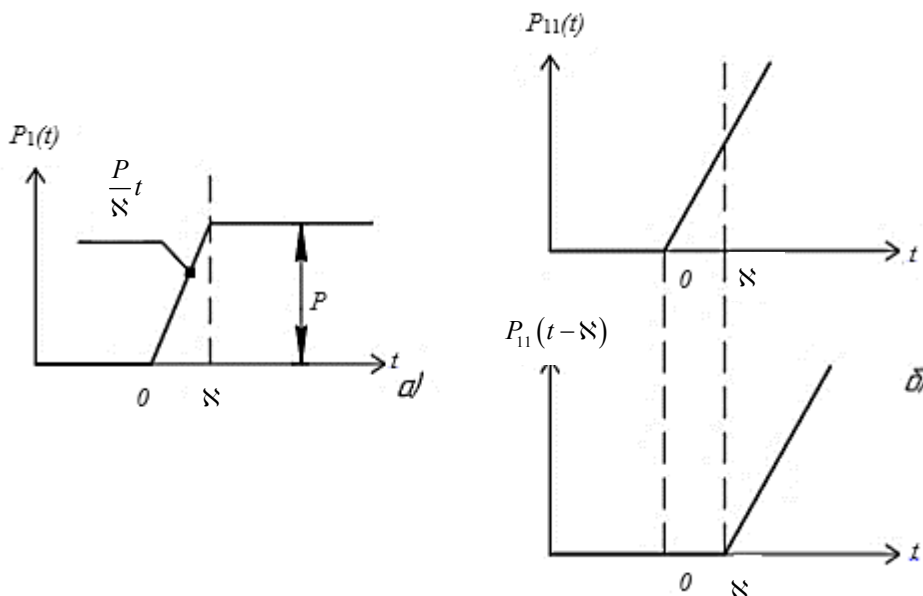


Рис.3. Моделювання перехідного процесу зростання тиску

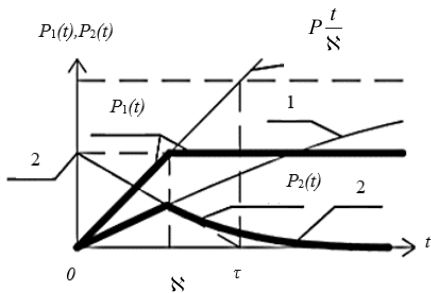


Рис. 14,а. Діаграма зміни тиску за виразом (15) при

$$1: P \frac{\tau}{N} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) e^{\frac{t}{N}},$$

$$2: P \frac{\tau}{N} \left(e^{\frac{t}{\tau}} - 1 \right) e^{\frac{t}{N}}$$

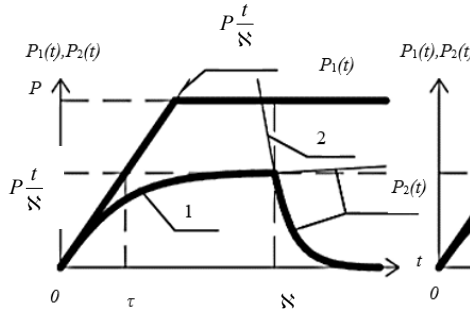


Рис. 14,б. Діаграма зміни тиску за виразом (16) при

$$1: P \frac{\tau}{N} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) e^{\frac{t}{N}},$$

$$2: P \frac{\tau}{N} \left(e^{\frac{t}{\tau}} - 1 \right) e^{\frac{t}{N}}$$

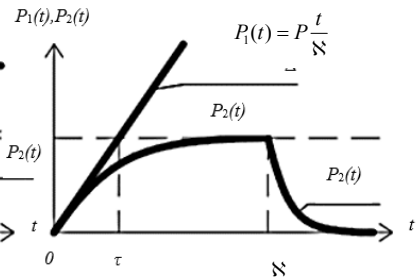


Рис. 15. Результуюча діаграма зміни тиску за виразом (16) при

$$t \leq N, e^{\frac{N}{\tau}} \leq 1.$$

У цьому випадку діаграма зміни тиску $P_2(t)$ досить близька до прямокутної (рис. 15) тобто відповідає похідній від прикладеного тиску $P_1(t)$

Отже, попри загальної функції тиску (16), нам необхідно визначитися з швидкістю руху та довжиною шляху, який проходить індентор під час дослідження твердості. Користуючись тою ж самою методикою, маємо можливість визначитися з швидкістю у ідеалізованому випадку. У цьому випадку швидкість руху індентора формалізовано відповідає виразу (16).

Користуючись аналогіями до всього викладеного вище, маємо можливість сформулювати процес швидкості руху під час визначення твердості матеріалу. На наступному етапі у ідеалізованому розгляді маємо розглядати функцію швидкості руху індентора як функцію руху залежну від тиску. Отже, як наслідок, користуючись аналогіями, маємо можливість відобразити дві відповідні функції з (15) та (16). У цьому випадку вирази (15) та (16) є діаграмою прискорення, що відображена через $P_2(t)$. Якщо ми проведемо дослідження стосовно швидкості, користуючись попередньою методикою, то маємо можливість отримати наступний результат:

$$V_p(t) = V_p \left[1 - \frac{\tau}{N} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right] \text{ при } t < N \quad (20)$$

та

$$V_p(t) = V_p \left[1 - \frac{\tau}{N} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \left(e^{\frac{N}{\tau}} - 1 \right) \right] \text{ при } t > N \quad (21)$$

Довжина шляху, який проходить індентор, у цих випадках визначається як:

$$L_{tp}(t) = \int_0^N V_p \left[1 - \frac{\tau}{N} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right] dt \text{ при } t < N \quad (22)$$

та

$$L_{tp}(t) = \int_0^N V_p \left[1 - \frac{\tau}{N} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \left(e^{\frac{N}{\tau}} - 1 \right) \right] dt \text{ при } t > N. \quad (23)$$

Після інтегрування вирази (22) та (23) отримують наступний вигляд:

$$L_{tp}(t) = V_p \left[N - \tau \left(1 - e^{-\frac{N}{\tau}} \right) \right], \quad (24)$$

та

$$L_{tp}(t) = V_p \left[N + \frac{\tau^2}{N} \cdot e^{-\frac{N}{\tau}} \left(e^{\frac{N}{\tau}} - 1 \right) \right]. \quad (25)$$

Отже, отриманий результат дає опис двох можливих випадків при визначенні твердості матеріалів.

Перший вираз (24) стосується випадку, коли швидкість навантаження досить велика. У другому випадку ми маємо поступове навантаження (25), яке відрізняється від попереднього випадку.

Якщо ми проведемо порівняльний аналіз швидкостей, то отримаємо наступний результат. Оскільки швидкість за першого випадку значно більша, то необхідно прийняти деякі умови для вирішення цієї задачі. Початкова умова полягає у тому, що величини L_{tp} у (24) та (25) однакові, але при цьому $V_{p1} > V_{p2}$. Для цього приймемо емпіричні умови, що у (24) $\tau = 10N$, а у (25) $N = 10\tau$. Після підстановки цих значень у (24) та (25), відповідно, отримуємо результат, що доводить залежність швидкості руху індентора твердоміра від характеру тиску.

Висновки

Отже, внаслідок аналітичного моделювання показано, що процес визначення твердості матеріалу можливо виконати за допомогою розрахунків траєкторії та швидкості руху індентора твердоміра після торкання поверхні зразка. Наразі можливості сучасної техніки обробки матеріалів створюють технічну

базу для визначення параметрів твердості безпосередньо на обробному обладнанні, що підвищує точність виготовлення деталей.

У подальших дослідженнях доцільно продовжити аналіз руху індентора під час випробування на твердість матеріалів. Для цього у подальшому проаналізуємо модель визначення моменту торкання індентора до поверхні деталі, що впливає на точність вимірювання параметрів твердості матеріалу деталі.

Роботу було виконано за підтримки МОН України НДР ДР 0117U004263.

Література

1. Charles Kittel. Introduction to Solid State Physics, 8th Edition. Wiley; (November 11, 2004), 704.
2. В. С. Антонюк, С. А. Билоконь и М. А. Бондаренко, "Особенности измерения микротвердости диэлектрических поверхностей кремниевым зондом атомно-силового микроскопа", *Наноинженерия*. **33** (3). 13-16 (2014).
3. M. Bondarenko, I. Bondarenko, V. Antoniuk, " Peculiarities of metalized surfaces modification of silicon elements of microelectromechanical systems with low-power electronic flow", *Materials science. Non-equilibrium phase transformations*. III (2). 2017, 53-55 (2017).
4. Костин П.П. Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов: Учеб. пособие для профессионально-технических училищ. М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.
5. E. J. A. Armarego, R. H. Brown. The machining of metals. Prentice-Hall, (1969), Technology & Engineering, 437.
6. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость инструмента. М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
7. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
8. Зубчанинов В.Г. Основы теории упругости и пластичности: Учеб. для машиностроит. спец вузов. М.: Высш.шк., 1990. – 368 с.
9. Тимчик Г.С., Скицюк В.І., Ключко Т.Р. Теоретичні засади технології ТОНТОР: монографія. Київ: НТУУ «КПІ», 2006. – 234 с.
10. Скицюк В.І., Ключко Т.Р. Физика технологии ТОНТОР: монография. Саарбрюкен (Германия): ИД LAP Lambert Academic Publishing, 2015. – 332 с.

УДК 621.3

В. И. Скицюк, М. О. Булик, М. Н. Печонка, Т. Р. Ключко, Г. С. Тимчик

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", Киев, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ ИНДЕНТОРА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛА ДЕТАЛИ

В статье говорится об актуальной проблеме измерения параметров твердости материала деталей различного назначения, которые предназначены для работы в условиях больших нагрузок, а также при изготовлении искусственных имплантов, предназначенных для внедрения в живом организме и функционирования их в течение очень длительного времени. Это создает дополнительные требования к качеству этих деталей.

Рассмотрена проблема определения момента касания индентора к поверхности детали и скорости движения индентора при измерении твердости и микротвердости материала деталей. Создана модель переходного процесса роста давления, образующегося при измерении и зависит от типа нагрузки. В дальнейших исследованиях целесообразно продолжить анализ движения индентора при испытании на твердость материалов. Для этого в дальнейшем проанализируем модель определения момента касания индентора к поверхности детали, влияет на точность измерения параметров твердости материала детали.

Ключевые слова: твердость, микротвердость, материал, деталь, имплант, измерения, механическая обработка.

V. Skytsiuk, M. Bulyk, M. Pechonka, T. Klotchko, G. Tymchik

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

MODELING OF CONTROLLED MOVEMENT OF THE INDENTOR WHILE MEASURING THE HARDNESS OF THE DETAIL'S MATERIAL

Introduction. The article deals with the actual problem of measuring the hardness parameters of various parts of the material, which are designed to work under conditions of high loads, as well as in the manufacture of artificial implants intended for introduction into the living body and functioning for a very long time. This creates additional requirements for the quality of these parts. Currently, there are development tools for measuring the value of microhardness, however, they are either not intended for use on machines, or portable devices can not withstand the necessary accuracy.

Main part. The problem of determining the moment of contact of the indenter with the surface of the part and the speed of motion of the indenter when measuring the hardness and microhardness of the material of the parts is considered. the result gives a description of two possible cases in determining the hardness of materials.

The first expression refers to the case when the loading speed is large enough. In the second case, we have a gradual load, which differs from the previous case. After accepting these conditions, we obtain the result, which proves the dependence of the speed of the indenter of the rigid meter on the nature of the pressure.

If we do a comparative analysis of the velocities, then we get the following result. Since the speed in the first case is much higher, then some conditions need to be taken to solve this problem.

A model is created for the transient process of pressure growth, formed during measurement and depends on the type of load. In further studies, it is advisable to continue the analysis of the motion of the indenter when testing for hardness of materials.

Conclusion. To do this, we will further analyze the model for determining the moment of contact of the indenter with the surface of the workpiece, affecting the accuracy of measuring the hardness parameters of the material of the workpiece.

Key words: hardness, microhardness, material, part, implant, measurements, machining

Надійшла до редакції

23 квітня 2018 року

Рецензовано

18 травня 2018 року