

УДК 621.9.048

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-15-5>

Денисюк В.Ю., к.т.н., Симонюк В.П., к.т.н., Лапченко Ю.С., к.т.н., Карманський М.В., Ніщот Р.В.

Луцький національний технічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВЗАЄМОДІЇ ДЕТАЛІ І ГРАНУЛ ПРИ УДАРНОМУ НАВАНТАЖЕННІ ВІБРОБУНКЕРА

В статті розглянуто результати досліджень високочастотних хаотичних вібраційних переміщень елементів робочого середовища (гранул абразиву). Встановлено, що в робочому середовищі має місце хаотичний рух окремих елементів (гранул абразиву) який обумовлений ударними навантаженнями на гранулу з боку сусідніх гранул. Хаотичний рух проявляється у вигляді відхилень траєкторії руху окремої гранули від середньої траєкторії циркуляційного руху. Відхилення траєкторії близьке до гармонічного (синусоїдального) закону. Обробка деталі в основному здійснюється при відносному переміщенні деталі відносно гранул абразиву при ударі вібробункера. Швидкість переміщення деталі відносно гранул залежить від випадкового положення деталі відносно напрямку вектора швидкості деталі при ударі. Кореляційна функція і спектральна щільність випадкових значень швидкості взаємних переміщень деталей і гранул відповідає сумі процесів з обмеженим спектром і постійними значеннями спектральній щільності. Інтенсивність імпульсних навантажень на деталь змінюється по площі вібробункера. Ділянка підвищеної інтенсивності навантажень зосереджена в місцях взаємодії вібробункера з упором. При включенні трьох електромагнітів наявні три ділянки підвищеної інтенсивності з максимально можливими ударними навантаженнями. Тому одночасне включення трьох магнітів забезпечує найбільшу продуктивність обробки.

Ключові слова: вібраційна обробка, вібробункер, гранула, абразив, циркуляційний рух, траєкторія, імпульс, навантаження, електромагніт.

Постановка проблеми. На процес вібраційної обробки деталей вільними абразивами мають вплив конструкція деталі, її форма, вага, матеріал, фізико-хімічний склад поверхневого шару, вимоги до обробленої деталі, матеріал абразиву, його зернистість, режими обробки тощо.

Саме до технологічних факторів процесу відносяться: продуктивність при заданій якості, вибір абразивних матеріалів і режимів обробки, необхідність застосування хімічних добавок в робочі розчини або нагрівання їх з метою підвищення ефективності обробки [1].

Практика показує, що на результати процесу впливають декілька десятків різних факторів, з яких необхідно вибрати оптимальне співвідношення. Складність цієї роботи вимагає проведення відповідних досліджень для кожного випадку переведення обробки деталей на вібраційні методи обробки, особливо якщо за технічними вимогами необхідне використання вібраційного шліфування і полірування [2, 3, 4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В залежності від призначення технологічної операції можуть застосовуватись абразивні й інші неметалічні матеріали з різними характеристиками, а також металічні середовища з робочими тілами відповідної форми і розмірів. Інтенсивність вібраційної обробки залежить від режимів і часу обробки, характеристики і розмірів частинок робочого середовища, механічних властивостей матеріалу оброблюваних деталей та ін. До числа основних параметрів даного процесу відносяться: характер руху робочої камери і частинок робочого середовища, їх швидкість і пришвидшення, сила мікроударів, контактні тиски, температура, яка виникає в зоні дії мікроударів, середня температура в робочій камері. На швидкість руху робочого середовища впливає амплітуда і частота коливань. Із їх збільшенням швидкість циркуляції робочого середовища зростає. На швидкість циркуляції дещо менший вплив має кількість і характер рідинного розчину, грануляція і форма частинок робочого середовища, заповнений об'єм робочої камери [5, 6, 7].

Динамічний вплив робочого середовища залежить від глибини занурення, відстані від стінок робочої камери, режимів вібрації, розмірів і питомої ваги частинок робочого середовища. Він зростає із збільшенням амплітуди та частоти коливань, глибини занурення, розмірів і питомої ваги частинок робочого середовища, а також від наближеності оброблюваних деталей до стінок робочої камери. Орієнтація оброблюваних деталей безперервно змінюється в процесі обробки деталей. Вільно завантажені деталі рухаються в потоці робочого середовища з деяким відставанням, в порівнянні з частинками наповнювача. В процесі обробки, деталі стараються розміститись по периферії циркулюючого робочого середовища [5, 7].

Формування поверхневого шару в процесі вібраційної обробки відбувається під дією багаторазових мікроударів частинок робочого середовища, які викликають утворення слідів обробки, зміну геометричних і фізико-механічних параметрів поверхневого шару (шорсткості, мікротвердості, залишкових напружень і структури). Форма і розміри слідів обробки визначаються параметрами робочого середовища, режимами обробки, властивостями оброблюваного матеріалу.

Послання таких елементів процесу як послідовне нанесення великої кількості мікроударів, інтенсивне перемішування робочого середовища і оброблюваних деталей при їх різній швидкості перемішування і взаємній орієнтації, супроводжується (в залежності від характеристики робочого середовища і режимів вібрування) зніманням металу і його окислів, поверхневим пластичним деформуванням, і створює умови для виконання очисних, викінчувальних, шліфувальних і інших операцій [6].

Мета роботи. Встановлення основних закономірностей повільного циркуляційного руху робочого середовища та визначення процесу взаємодії деталі і гранул при ударному навантаженні вібробункера.

Викладення основного матеріалу. Ударно-імпульсні навантаження на вібробункер приводять до виникнення повільного циркуляційного руху робочого середовища. В робочому середовищі має місце хаотичний рух окремих елементів (гранул абразиву), який обумовлений ударними навантаженнями на гранулу з боку сусідніх гранул. Хаотичний рух проявляється у вигляді відхилень траєкторії руху окремої гранули від середньої траєкторії циркуляційного руху. Відхилення траєкторії близьке до гармонічного (синусоїдального) закону. Обробка деталі в основному здійснюється при відносному переміщенні деталі відносно гранул абразиву при ударі вібробункера. Швидкість переміщення деталі відносно гранул залежить від випадкового положення деталі відносно напрямку вектора швидкості деталі при ударі [3].

Розглянуті закономірності повільного та вібраційного руху забезпечують рівномірність обробки. Вони є аналогами руху подачі при традиційній лезовій обробці. Процеси обробки деталей забезпечуються віброімпульсними процесами взаємодії поверхні деталі та гранул абразиву.

Обробка поверхні забезпечується рухом деталі при ударі дна вібробункера по упору. Густина деталі набагато більша густини абразиву, тому при ударі деталь буде рухатись за інерцією відносно сусідніх гранул абразиву (рис. 1).

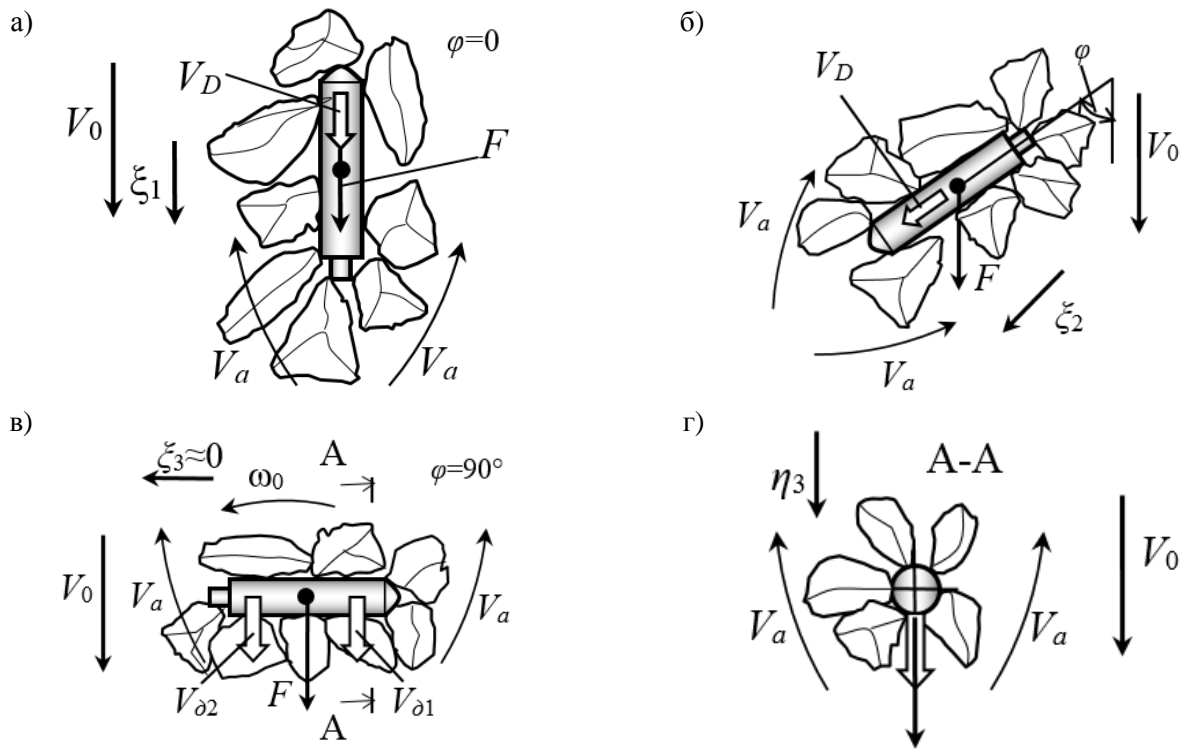


Рис. 1. Взаємне зміщення деталі та гранул абразиву при ударному навантаженні на вібробункер

Якщо напрям швидкості V_a співпадає із віссю деталі (рис. 1, а), то вона буде переміщуватись на більшу відстань ξ_1 . При розташуванні деталі під кутом (рис. 1, б), її переміщення ξ_2 буде меншим ніж ξ_1 . Відповідно буде менш ефективним процес знімання металу з поверхні деталі. Найменші переміщення деталі мають місце у випадку, коли її вісь перпендикулярна напрямку швидкості V_0 .

При цьому осьове переміщення деталі ξ_3 практично відсутнє. Має місце зміщення деталі в напрямку η_3 . Але це зміщення є незначним по причині великого опору. Тому його вплив на ефективність обробки є несуттєвим. Положення деталі в просторі є випадковим і змінюється в процесі руху робочого середовища. Для характеристики випадкового положення деталі використано випадкову величину (кут φ). Кут φ змінюється в межах $\pm 90^\circ$. При цьому, процес обробки є найбільш ефективним при $\varphi=0$. Для випадкового положення деталі складена динамічна модель її руху відносно гранул абразиву.

Динамічна модель руху деталі подана у вигляді одномасової системи, напрям переміщення якої (кут φ) є випадковим (рис. 2).

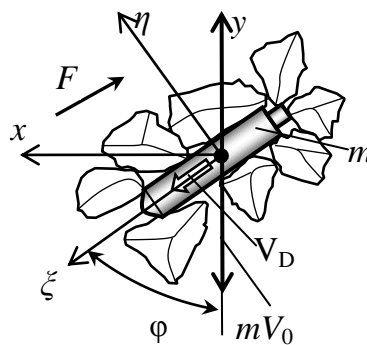


Рис. 2. Розрахункова схема робочого переміщення деталі відносно абразиву при ударі вібробункера

Відповідно розрахункової схеми складено диференціальне рівняння переміщення деталі:

$$m \frac{d^2 \xi}{dt^2} + b \frac{d\xi}{dt} = 0, \quad (1)$$

де m – маса деталі, яка зміщується на величину ξ , b – коефіцієнт опору переміщення деталі, що залежить від випадкового значення кута φ ; t – час.

Коефіцієнт опору залежить від нормальної сили взаємодії деталі і гранули абразиву. Нормальна сила визначається гравітаційною силою mg (g – прискорення вільного падіння) та кута її дії.

При вертикальному положенні деталі ($\varphi=0$) гравітаційна сила не впливає на нормальне навантаження. При куті $\varphi=\pi/2$ нормальне навантаження є максимальним. Тому для аналітичного визначення коефіцієнта опору запропонована залежність:

$$b = b_0 + c_b \cdot mg \sin \varphi, \quad (2)$$

де b_0 – постійне значення коефіцієнта опору, яке не залежить від маси деталі, а визначається лише її стисненням гранулами абразиву; c_b – середній коефіцієнт сухого тертя деталі і абразиву.

Початковими умовами для рівняння (1) є наступні: при $t=0$, $\xi=0$,

$$\frac{d\xi}{dt} = V_0 \cos \varphi \quad (3)$$

Проведено однократне інтегрування рівняння (1) і одержано:

$$m \frac{d\xi}{dt} + b\xi = C_1 \quad (4)$$

де C_1 – константа інтегрування. Вона знаходиться із початкових умов. Підставивши початкові умови (3) в залежність (4), одержимо:

$$C_1 = mV_0 \cos \varphi.$$

Перетворимо рівняння (4) до виду:

$$\frac{m \cdot d\xi}{(-mV_0 \cos \varphi + b\xi)} = -dt.$$

Проінтегруємо дане рівняння в межах від $t=0$, $\xi=0$ до t , ξ :

$$\frac{m}{b} \int_0^\xi \frac{d\xi}{\left(\xi - \frac{mV_0 \cos \varphi}{b}\right)} = - \int_0^t dt.$$

Обчисливши даний інтеграл остаточно одержимо розв'язок рівняння:

$$\ln \left| \xi - \frac{mV_0 \cos \varphi}{b} \right| - \ln \left| -\frac{mV_0 \cos \varphi}{b} \right| = -\frac{b}{m} t.$$

Після потенціювання одержаного співвідношення одержимо:

$$\xi = \frac{mV_0 \cos \varphi}{b} \left(1 - e^{-\frac{b}{m} t} \right). \quad (5)$$

Підставимо в залежність (5) значення коефіцієнта опору (3) і одержимо розрахункове переміщення деталі під дією ударного імпульсу:

$$\xi = \frac{mV_0 \cos \varphi}{b_0 + c_b mg \sin \varphi} \left[1 - e^{-\left(\frac{b_0 + c_b mg \sin \varphi}{m}\right)t} \right]. \quad (6)$$

Максимальне переміщення має місце в кінці процесу (при $t \rightarrow \infty$). Підставивши значення t в формулу (6), одержимо:

$$\xi_{\max} = \frac{mV_0 \cos \varphi}{b_0 + c_b mg \sin \varphi}.$$

Переміщення деталі відносно гранули абразиву проходить під час удару і є основним чинником процесу обробки. Інтенсивність обробки поверхні визначається швидкістю різання. В даному випадку, швидкістю різання V_D є швидкість взаємного зміщення деталі і гранули абразиву, яка направлена на осі деталі. Швидкість V_D буде визначена диференціюванням залежності (6) і складає:

$$V_D = \frac{d\xi}{dt} = V_0 \cos \varphi e^{-\left(\frac{b_0 + c_b g \sin \varphi}{m}\right)t}. \quad (7)$$

Швидкість різання змінюється в часі від максимального значення до нуля. Максимальна швидкість має місце при $t=0$. Вона визначається із залежності (7):

$$V_{\max} = \left. \frac{d\xi}{dt} \right|_{\max} = V_0 \cos \varphi.$$

В результаті наведеного розрахунку можна зробити висновок, що переміщення і швидкість руху деталі змінюються в часі по аперіодичному закону (рис. 3).

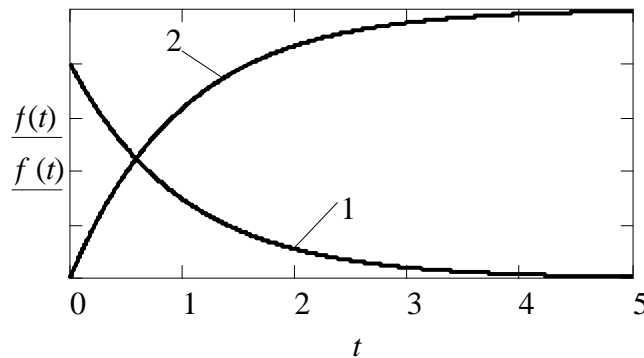


Рис. 3. Робоче переміщення деталі відносно гранул (крива 1) та швидкість взаємного переміщення деталі і гранули (крива 2)

Із аналізу графіків випливає, що процес обробки в основному забезпечується в проміжок часу $t=0 \dots t_0$.

Положення деталі в робочому середовищі є невизначеним. Воно визначається випадковим кутом φ . Швидкість різання характеризується максимальним значенням $V_0 \cos \varphi$, де, $-\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$. Зміни максимальної швидкості по куту обумовлюють різний ступінь ефективності обробки деталі в залежності від її кутового положення. Найбільш ефективний процес різання при вертикальному розташуванні деталі $\varphi \approx 0$. При кутах $|\varphi| \approx \frac{\pi}{2}$ процес обробки є малоефективним.

Швидкість різання як випадкова величина має певні статистичні характеристики. Основними з них є кореляційна функція та спектральна щільність. Вони знайдені шляхом статистичної обробки.

Рух деталі після дії імпульсного навантаження визначиться формулою (7), яка подана у вигляді:

$$V_K = \frac{1}{T} Q_K \cdot e^{-\frac{(t-T_k)}{T}}, \quad (8)$$

$$\text{де, } Q_K = \frac{V_0 \cos \varphi}{\left(\frac{b_0}{m} + c_b g \sin \varphi\right)}, T = \frac{1}{\left(\frac{b_0}{m} + c_b g \sin \varphi\right)}.$$

Імпульсні навантаження на деталь діють періодично з частотою f_z і викликають сумарну зміну швидкості, яку можна визначити користуючись принципом суперпозиції. Відповідно значення швидкості в момент часу t складає:

$$V(t) = \frac{1}{T} \sum_{T_k \leq t} Q_K \cdot e^{-\frac{(t-T_k)}{T}}, \quad (9)$$

де сума береться для всіх значень $t \geq T_k$.

Залежність (9) визначає зміну швидкості деталі під дією імпульсних навантажень, які відбуваються лише в одній точці. Зміна швидкості в часі представляє собою випадковий процес.

Загальна швидкість елемента відповідає суперпозиції збурень швидкості від кожного ударного імпульсу і визначається сумою:

$$V_{\Sigma}(t) = \sum_{j=1}^M V_j(t),$$

де M – загальне число ударних імпульсів.

Реалізація випадкової зміни сумарної швидкості відповідає сумі випадкових процесів. Визначимо окремо кожен випадковий процес і знайдемо його спектральні характеристики згідно з методикою [2].

Розглянемо проміжок часу (s, t) , причому $s \rightarrow -\infty$. Швидкість, яка спричинена імпульсними навантаженнями, що мають місце в проміжку часу (s, t) , позначимо $V_s(t)$. Прийmemo, що число ударів, що мало місце за даний проміжок часу, в середньому складало μ ударів в одиницю часу. Удари є не частими подіями, тому величина μ мала. Число ударів в одиницю часу μ відповідає частоті імпульсів. Тому:

$$\mu \cong f_z.$$

Число ударів можна вважати розподіленим за законом Пуассона (закон не частих подій), причому математичне сподівання цього розподілу:

$$\lambda = \mu(t - s).$$

Визначимо випадкову подію e_m , яка відповідає числу ударів $m = 0, 1, 2, \dots$ за проміжок часу (s, t) . Ймовірність цієї події:

$$P(e_m) = \frac{\lambda^m \cdot e^{-\lambda}}{m!}, m = 0, 1, 2, \dots$$

Для проміжку часу (s, t) при кількості ударів m швидкість деталі визначається залежністю:

$$V_s(t) = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^m Q_K \cdot e^{-\frac{(t-T_k)}{T}}. \quad (10)$$

Дана залежність є основою для розрахунків випадкового процесу зміни швидкості деталі в процесі її ударно-імпульсної обробки.

Визначені спектральні характеристики випадкового процесу флуктуації швидкості деталі. Для цього виконано аналіз залежності (10). Розглянемо всі можливі випадки наявності кількох ударів на деталь в одиницю часу ($m = 1, 2, 3, \dots$).

Знайдемо математичне сподівання випадкової функції $V_s(t)$:

$$M[V_s(t)] = \sum_{m=0}^{\infty} P(e_m) M[V_s(t) | e_m], \quad (11)$$

де, $M[V_s(t) | e_m]$ – умовне математичне сподівання випадкової функції $V_s(t)$ за умови здійснення події e_m .

Умовне математичне сподівання розраховується на основі формули (9) шляхом знаходження статистичного середнього по всіх можливих значеннях інтенсивності ударів Q_K та

всіх можливих моментах ударів T_k при фіксованому числі ударів, що діють в інтервалі часу (s, t).

Враховуючи незалежність випадкових величин Q_k і T_k , одержимо:

$$M[V_s(t) | e_m] = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^m M \left[Q_k \cdot e^{-\frac{(t-T_k)}{T}} \right] = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^m M[Q_k] \cdot M \left[e^{-\frac{(t-T_k)}{T}} \right]. \quad (12)$$

Математичне сподівання експоненціальної функції:

$$M \left[e^{-\frac{(t-T_k)}{T}} \right] = \int_s^t e^{-\frac{(t-\tau)}{T}} \cdot P_{TK}(\tau) d\tau,$$

де, $P_{TK}(\tau)$ – щільність ймовірності випадкової величини T_k .

Цю щільність ймовірності прийемо постійною $P_{TK}(\tau) = 1/(t-s)$, оскільки моменти ударів розподілені в проміжку часу (s, t) рівномірно.

Таким чином, математичне сподівання експоненціальної функції:

$$M \left[e^{-\frac{(t-T_k)}{T}} \right] = \frac{1}{t-s} \int_s^t e^{-\frac{(t-\tau)}{T}} d\tau = \frac{T}{t-s} \left(1 - e^{-\frac{(t-s)}{T}} \right). \quad (13)$$

Позначивши математичне сподівання інтенсивності удару $M[Q_k] = q$, одержимо:

$$M[V_s(t) | e_m] = \sum_{k=1}^m \frac{q}{t-s} \left(1 - e^{-\frac{(t-s)}{T}} \right) = \frac{mq}{t-s} \left(1 - e^{-\frac{(t-s)}{T}} \right). \quad (14)$$

Використовуючи значення (14), знайдемо з (11) математичне сподівання випадкової функції $V_s(t)$:

$$M[V_s(t)] = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{[\mu(t-s)]^m \cdot e^{-\mu(t-s)}}{m! \cdot (t-s)} mq \left(1 - e^{-\frac{(t-s)}{T}} \right).$$

Після перетворення даної залежності одержимо:

$$M[V_s(t)] = \mu q e^{-\mu(t-s)} \left(1 - e^{-\frac{(t-s)}{T}} \right) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{[\mu(t-s)]^{m-1}}{(m-1)!}.$$

Враховуючи, що експоненціальна функція відповідає ряду:

$$e^z = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!},$$

одержимо, підставивши замість $z = \mu(t-s)$:

$$e^{\mu(t-s)} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{[\mu(t-s)]^{m-1}}{(m-1)!}.$$

Таким чином, математичне сподівання швидкості деталі, яку вона набуває внаслідок ударів, складе:

$$M[V_s(t)] = \mu q \left(1 - e^{-\frac{(t-s)}{T}} \right). \quad (15)$$

В граничному випадку $s \rightarrow -\infty$ значення математичного сподівання швидкості деталі визначається залежністю:

$$M[V_s(t)] = \mu q. \quad (16)$$

Знайдемо кореляційну функцію швидкості деталі. Для цього розглянемо значення величин у два моменти часу t і t' . Для $t' > t$ із формули (9) одержимо:

$$V(t') = \frac{1}{T} \sum_{T_k \leq t'} Q_k \cdot e^{-\frac{(t'-T_k)}{T}}. \quad (17)$$

Сума в правій частині (17) може бути розділена на дві складові. Відповідно знайдемо:

$$V(t') = \frac{1}{T} \sum_{T_k \leq t} Q_k \cdot e^{-\frac{(t'-T_k)}{T}} + \frac{1}{T} \sum_{t \leq T_k \leq t'} Q_k \cdot e^{-\frac{(t'-T_k)}{T}}. \quad (18)$$

З формули (18), враховуючи (9), випливає:

$$V(t') = V(t) \cdot e^{-\frac{t'-t}{T}} + \frac{1}{T} \sum_{t \leq T_k \leq t'} Q_k \cdot e^{-\frac{(t'-T_k)}{T}}. \quad (19)$$

Другий доданок в (19) не залежить від $V(t)$, тому що він включає інші випадкові величини. Тому кореляційна функція дорівнює кореляційному моменту величин:

$$V(t) e^{-\frac{t'-t}{T}} \quad \text{та} \quad V(t).$$

Відповідно значення кореляційної функції флуктуацій швидкості деталі складе:

$$R_{\omega}(t, t') = D[V(t)] \cdot e^{-\frac{t'-t}{T}}. \quad (20)$$

Знайдемо дисперсію швидкості $D[V(t)]$. Дисперсія (умовна) випадкової функції $V_s(t)$ за умови, що на деталь діє m ударів за час (s, t) , дорівнює сумі дисперсій доданків у формулі (20) (внаслідок незалежності доданків). Знайдемо дисперсію одного доданку. Його центральний момент другого порядку:

$$M\{[V_s(t)]^2\} = M\left[Q_k^2 e^{-\frac{2(t-T_k)}{T}}\right] = M[Q_k^2] \cdot M\left[e^{-\frac{2(t-T_k)}{T}}\right]. \quad (21)$$

Математичне сподівання інтенсивності ударів Q_k дорівнює q . Дисперсію інтенсивності ударів позначимо D . Тоді

$$M[Q^2 K] = q_2 + D. \quad (22)$$

Математичне сподівання експоненціальної функції $e^{-\frac{2(t-T_k)}{T}}$ знайдемо за формулами (12) та (13), в яких замість $T \rightarrow T/2$.

Відповідно, значення математичного сподівання експоненціальної функції:

$$M\left[e^{-\frac{2(t-T_k)}{T}}\right] = \frac{T}{2(t-s)} \left(1 - e^{-\frac{2(t-s)}{T}}\right). \quad (23)$$

В результаті одержимо умовну дисперсію швидкості деталі $V_s(t)$ за умови, що за час (s, t) на деталь діє m ударів:

$$D[V_s(t) | e_m] = \frac{m(q^2 + D)}{2T(t-s)} \left(1 - e^{-\frac{2(t-s)}{T}}\right) - \frac{mq^2}{(t-s)^2} \left(1 - e^{-\frac{t-s}{T}}\right)^2. \quad (24)$$

Дисперсія випадкової кутової швидкості:

$$D[V_s(t)] = \sum_{m=0}^{\infty} D[V_s(t) | e_m] \cdot P(e_m).$$

Після підстановки значень величин із (24) одержимо:

$$D[V_s(t)] = \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{m(q^2 + D)}{2T(t-s)} \left(1 - e^{-\frac{2(t-s)}{T}}\right) - \frac{mq^2}{(t-s)^2} \left(1 - e^{-\frac{t-s}{T}}\right)^2 \right] \cdot \frac{[\mu(t-s)]^m \cdot e^{-\mu(t-s)}}{m!}.$$

Після спрощення, відповідно до формул (14) та (15), знайдемо:

$$D[V_s(t)] = \frac{\mu(q^2 + D)}{2T} \left(1 - e^{-\frac{2(t-s)}{T}}\right) - \frac{\mu q^2}{t-s} \left(1 - e^{-\frac{t-s}{T}}\right)^2. \quad (25)$$

В граничному випадку $s \rightarrow -\infty$ значення дисперсії швидкості деталі визначається залежністю:

$$D[V(t)] = \frac{\mu(q^2 + D)}{2T}. \quad (26)$$

Використовуючи значення дисперсії, одержимо кореляційну функцію швидкості деталі, відповідно при дії ударних імпульсів лише в одній точці у вигляді:

$$R_V(t, t') = \frac{\mu(q^2 + D)}{2T} \cdot e^{-\frac{t'-t}{T}}. \quad (27)$$

Якщо $t' < t$, то відповідно в степені експоненти зміниться порядок доданків і тому для всіх значень t' і t будемо мати:

$$R_V(t, t') = \frac{\mu(q^2 + D)}{2T} \cdot e^{-\frac{|t-t'|}{T}}, \quad (28)$$

де μ – число імпульсних навантажень на деталь в одиницю часу (частота навантажень);
 q – математичне сподівання інтенсивності ударних імпульсів;
 D – дисперсія інтенсивності імпульсів, що діють на деталь;
 T – постійна часу.

Всі ці параметри залежать від місця дії імпульсного навантаження на деталь.

Швидкість деталі є сумою випадкових змін швидкості, обумовлених ударами в різних точках.

Будемо вважати зміни швидкості, що мають місце під дією імпульсних навантажень у різних точках некорельованими. При цьому кореляційна функція буде визначатися наступною формулою:

$$R_\Sigma(t, t') = \sum_{\xi=1}^Z \frac{\mu_\xi(q_\xi^2 + D_\xi)}{2T_\xi} \cdot e^{-\frac{|t-t'|}{T_\xi}}, \quad (29)$$

де, Z – число точок, в яких діють ударні навантаження;

μ_ξ – частота навантажень в ξ -ій точці;

q_ξ, D_ξ – математичне сподівання та дисперсія інтенсивності імпульсів;

T_ξ – постійна часу, визначена для деталі, на ξ -ту точку якої діє ударне навантаження.

Формула (29) дозволяє визначити кореляційну функцію випадкових флуктуацій швидкості деталі. Із аналізу кореляційної функції швидкості деталі випливає, що вона залежить лише від різниці:

$$\tau = t - t',$$

тобто відповідає стаціонарному випадковому процесу. Тому кореляційна функція подана у вигляді:

$$R_V(\tau) = \sum_{\xi=1}^Z \frac{\mu_\xi(q_\xi^2 + D_\xi)}{2T_\xi} \cdot e^{-\frac{|\tau|}{T_\xi}}. \quad (30)$$

Даній кореляційній функції відповідає спектральна щільність випадкового процесу зміни швидкості руху деталі:

$$S_V(\omega) = \sum_{\xi=1}^Z \frac{\mu_\xi(q_\xi^2 + D_\xi)}{2} \cdot \frac{1}{(1 + T_\xi^2 \omega^2)}, \quad (31)$$

Таким чином, встановлено, що кореляційна функція випадкових змін швидкості деталі внаслідок ударних навантажень є набором (сумою) експоненціальних функцій, а спектральна щільність випадкового процесу зміни швидкості являє собою суму дробово-раціональних функцій від квадрата частоти. Дані статистичні характеристики дають можливість встановити частотний діапазон випадкових змін швидкості деталі та дисперсію швидкості деталі, яку вона набуває внаслідок дії ударних навантажень.

Розрахунок статистичних характеристик, відповідних формулам (30) і (31) дає можливість встановити основні параметри випадкового процесу зміни швидкості деталі під дією ударно-імпульсних навантажень (рис. 4).

Статистичні характеристики процесу зміни швидкості є основою для знаходження дисперсії швидкості деталі, яку вона набуває під час ударно-імпульсних навантажень.

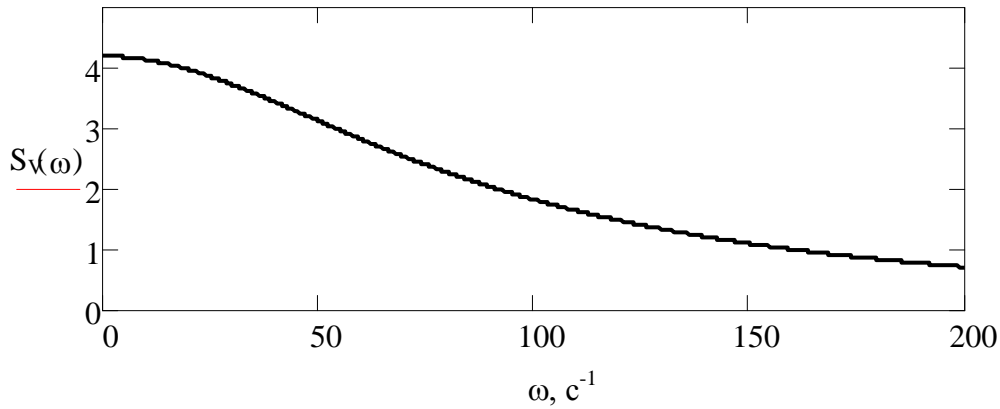


Рис. 4. Статистичні характеристики випадкових змін швидкості деталі, яку вона набуває під дією ударно-імпульсних навантажень

Інтенсивність імпульсних навантажень змінюється по площі вібробункера. Для областей вібробункера, близьких до розташування електромагнітів, інтенсивність ударних навантажень зростає, а в інших областях падає. Проведено розрахунки дисперсії швидкості деталей для різних ділянок вібробункера при вмиканні кількох електромагнітів. При вмиканні чотирьох електромагнітів має місце чотири ділянки збільшення дисперсії швидкості деталей (рис. 5).

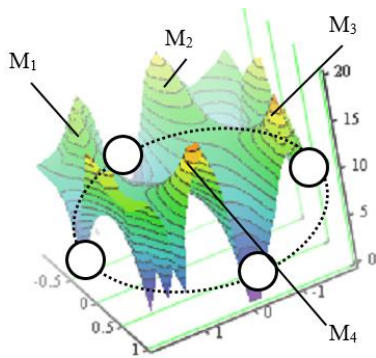


Рис. 5. Поле зміни дисперсії швидкості деталей, що спричинена ударно-імпульсними навантаженнями

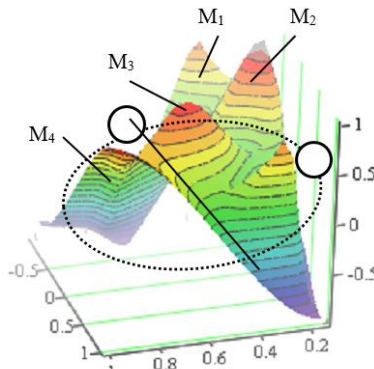


Рис. 6. Розподіл інтенсивності дисперсії швидкості деталей по площі вібробункера при його навантаженні двома магнітами

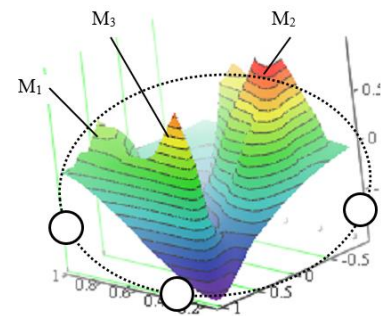


Рис. 7. Розподіл інтенсивності дисперсій при включенні трьох електромагнітів

На рис. 6 пунктирним колом показано периметр вібробункера та розташування чотирьох магнітів по його периферії. Із аналізу розподілу інтенсивності дисперсії випливає наявність чотирьох ділянок підвищеної інтенсивності швидкостей удару M_1 - M_4 . Це значить, що використання одночасно працюючих чотирьох магнітів забезпечує значну рівномірність інтенсивності обробки деталей по площі вібробункера.

Використання двох магнітів для вібраційного навантаження вібробункера формує три максимуми інтенсивності дисперсій (рис. 6).

Два максимуми M_1 , M_2 розташовані на периферії вібробункера між магнітами. Третій максимум дисперсії спостерігається в центрі вібробункера. Він обумовлений коливаннями дна, які стимулюють віброударні навантаження на деталь.

Включення трьох електромагнітів формує поле дисперсії із трьох максимумів. Вони розташовані в трьох радіальних напрямках, відповідних напрямкам розміщення електромагнітів, але зміщених відносно електромагнітів на кутову відстань близько 30° (рис. 7).

Інтенсивність максимумів змінюється. Як правило, один із максимумів перевищує два інші.

Висновки. Обробка деталі в основному здійснюється при відносному переміщенні деталі відносно гранул абразиву при ударі вібробункера. Швидкість переміщення деталі відносно гранул залежить від випадкового положення деталі відносно напрямку вектора швидкості деталі при ударі.

Кореляційна функція і спектральна щільність випадкових значень швидкості взаємних переміщень деталей і гранул відповідає сумі процесів з обмеженим спектром і постійними значеннями спектральній щільності. Резонансні властивості мало проявляються у випадкових змінах середньої швидкості невеликих деталей і гранул.

Інтенсивність імпульсних навантажень на деталь змінюється по площі вібробункера. Ділянка підвищеної інтенсивності навантажень зосереджена в місцях взаємодії вібробункера з упором. При включенні трьох електромагнітів наявні три ділянки підвищеної інтенсивності з максимально можливими ударними навантаженнями. Тому одночасне включення трьох магнітів забезпечує найбільшу продуктивність обробки.

Інформаційні джерела

1. Баби́чев А.П. Физико-технологические основы методов обработки: учебное пособие для вузов / А.П. Баби́чев. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2006. – 410 с.
2. Струтинський В.Б. Вдосконалення обладнання та процесу ударно-імпульсної обробки деталей у вібробункері: монографія / В.Б. Струтинський, В.П. Симонюк, В.Ю. Денисюк – Луцьк: СПД Гадяк Жанна Володимирівна друкарня “Волиньполіграф”^{ТМ}, 2016. – 139 с.
3. Струтинський В.Б. Дослідження закономірностей повільного циркуляційного вихрового руху робочого середовища у вібробункері / В.Б. Струтинський, В.П. Симонюк, В.Ю. Денисюк / «Перспективні технології та прилади». Збірник статей. Випуск 10(1). м. Луцьк, червень 2017 р. – Луцьк: Луцький НТУ, 2017. – С. 176–185.
4. Симонюк В.П. Дослідження залежностей режимів вібрування на рух робочого середовища при вібраційній обробці / В.П. Симонюк, В.Ю. Денисюк, Ю.С. Лапченко, В.В. Красовський / «Перспективні технології та прилади». Збірник наукових праць. Випуск 12. м. Луцьк, червень 2018 р. – Луцьк: Луцький НТУ, 2018. – С. 143–149.
5. Симонюк В.П. Математичне моделювання циркуляційного руху вібробункера / В.П. Симонюк, В.Ю. Денисюк, Ю.С. Лапченко, В.В. Красовський / Технічні вісті: науковий часопис, 2018/1(47), 2(48). – С. 63 – 66.
6. Симонюк В.П. Дослідження високочастотних хаотичних вібраційних переміщень елементів робочого середовища вібробункера / В.П. Симонюк, В.Ю. Денисюк, Ю.С. Лапченко, В.В. / «Перспективні технології та прилади». Збірник статей. Випуск 14. м. Луцьк, червень 2019 р. – Луцьк: Луцький НТУ, 2019. – С. 125–132.
7. V. Symonyuk Experimental study of circulating vortex movement working environment in vibrobunker / V. Symonyuk, V. Denysiuk, Y. Lapchenko / Mechanics, Materials Science & Engineering Journal. Volume 12, September 2017, Pages 41-54, DOI 10.2412/mmse.58.82.178 provided by.

Денисюк В.Ю., к.т.н., Симолюк В.П., к.т.н., Лапченко Ю.С. к.т.н., Карманский М.В., Нищот Р.В.

Луцкий национальный технический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЕТАЛИ И ГРАНУЛ ПРИ УДАРНОЙ НАГРУЗКЕ ВИБРОБУНКЕРА

В статье рассмотрены результаты исследований высокочастотных хаотических вибрационных перемещений элементов рабочей среды (гранул абразива). Установлено, что в рабочей среде имеет место хаотическое движение отдельных элементов (гранул абразива), которое обусловлено ударными нагрузками на гранулу со стороны соседних гранул. Хаотическое движение проявляется в виде отклонений траектории движения отдельной гранулы от средней траектории циркуляционного движения. Отклонение траектории близится к гармоничному (синусоидальному) закону. Обработка детали в основном осуществляется при относительном перемещении детали относительно гранул абразива при ударе вибробункера. Скорость перемещения детали относительно гранул зависит от случайного положения детали относительно направления вектора скорости детали при ударе. Корреляционная функция и спектральная плотность случайных значений скорости взаимных перемещений деталей и гранул соответствует сумме процессов с ограниченным спектром и постоянными значениями спектральной плотности. Интенсивность импульсных нагрузок на деталь меняется по площади вибробункера. Участок повышенной интенсивности нагрузок сосредоточен в местах взаимодействия вибробункера с упором. При включении трех электромагнитов имеются три участка повышенной интенсивности с максимально возможными ударными нагрузками. Поэтому одновременное включение трех магнитов обеспечивает наибольшую производительность обработки.

Ключевые слова: *вибрационная обработка, вибробункер, гранула, абразив, циркуляционное движение, траектория, импульс, нагрузка, электромагнит.*

V. Denysiuk, V. Symonyuk, Y. Lapchenko, M. Karmansky, R. Nishot
Lutsk National Technical University

MODELING THE DETAIL INTERACTION PROCESS AND PELLET AT SHOCK BUCKET LOAD

The results of studies of high-frequency chaotic vibrational displacements of elements of the working medium (abrasive granules) are considered in the article. It is established that in the working environment there is a chaotic movement of individual elements (abrasive granules) which is caused by shock loads on the granule from the neighboring granules. The chaotic motion is manifested in the form of deviations of the trajectory of movement of a single pellet from the average trajectory of circulating motion. The deviation of the trajectory is close to the harmonic (sinusoidal) law. The machining of the workpiece is mainly carried out with the relative movement of the workpiece relative to the abrasive granules upon impact of the vibrating hopper. The speed of movement of the part relative to the pellets depends on the random position of the part relative to the direction of the velocity vector of the part at impact. The correlation function and the spectral density of random values of the speed of mutual movement of parts and granules corresponds to the sum of processes with a limited spectrum and constant values of the spectral density. The intensity of impulse loads per workpiece varies over the area of the vibrating hopper. The site of high intensity of loads is concentrated in the places of interaction of the vibrating hopper with emphasis. With the inclusion of three electromagnets there are three sections of high intensity with the maximum possible shock loads. Therefore, the simultaneous inclusion of three magnets provides the highest processing performance.

Keywords: *vibration processing, vibration hopper, pellet, abrasive, circulatory motion, trajectory, momentum, load, electromagnet.*