

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ПОВІЛЬНОГО ЦИРКУЛЯЦІЙНОГО ВИХРОВОГО РУХУ РОБОЧОГО СЕРЕДОВИЩА У ВІБРОБУНКЕРІ

В статті представлені результати досліджень закономірностей циркуляційного вихрового руху робочого середовища та переміщення корпусу вібробункера при його симетричному ударно-імпульсному навантаженні. Встановлено, що ударно-імпульсні навантаження на вібробункер приводять до виникнення повільного циркуляційного руху робочого середовища, який інтенсифікується при несиметричному ударному навантаженні. Циркуляційний рух має вигляд кільцевого або дугоподібного вихрового кільця, яке охоплює весь об'єм робочого середовища. Для визначення характеру вихрового руху допустимим є застосування закону зміни кількості руху в інтегральній формі для виділеного контрольного об'єму робочого середовища. Середня швидкість циркуляційного руху залежить від інтенсивності удару, швидкості вібробункера до удару та маси робочого середовища. Кутова швидкість вихрового руху пропорційна середній швидкості циркуляційного руху.

Ключові слова: вібраційна абразивна обробка, вібробункер, циркуляційний рух, електромагніт, абразивний матеріал, ударна хвиля.

Постановка проблеми. Актуальність віброабразивних методів обробки деталей пояснюється перевагами цього методу над такими традиційними фінішними операціями як галтовка, шліфування, полірування. Віброабразивна обробка дозволяє забезпечити механізацію процесу обробки, покращити обробку геометрично складних зовнішніх і внутрішніх важкодоступних поверхонь деталей, а також обробку крихких і нежорстких деталей без порушення їх геометричної форми і пошкодження поверхонь.

Застосування віброобробки в якості фінішної операції дозволяє суттєво знизити собівартість виготовлення деталей, що мають шорсткість поверхні $Ra > 0$. Віброобробка, яка забезпечує отримання мікронерівностей порядку $0,15 \div 0,25$ мкм, в ряді випадків може замінити доводку, собівартість якої в 4-5 разів вища. При цьому точність геометричної форми деталі, отримана при шліфуванні, не порушується, так як в результаті віброобробки знімається шар металу не більше 1-2 мкм.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В інформаційних технічних джерелах вказано на високу продуктивність вібраційної обробки. Однак відсутність повної інформації про процеси, які відбуваються під час обробки деталей в робочому середовищі та технологічні можливості вібраційної обробки, а також рекомендацій для технологічного забезпечення механічної віброабразивної обробки стримує широке промислове впровадження і подальший розвиток цього прогресивного методу.

Зацікавленість віброабразивними методами обробки деталей пояснюється перевагами цього методу над такими традиційними викінчувальними операціями як галтовка, шліфування, полірування оскільки при цьому забезпечується механізація процесу обробки, обробка геометрично складних зовнішніх і внутрішніх важкодоступних поверхонь деталей, а також обробка крихких і нежорстких деталей без порушення їх геометричної форми і пошкодження поверхонь та деталей, які мають тенденцію до зчеплення при обробці їх в обертових барабанах. Особливо помітні переваги віброабразивної обробки при виготовленні деталей з високим класом чистоти поверхні. Це деталі підшипників кочення, інструмент (різці, свердла та фрези після термічної обробки і зварювання), деталі двигунів, верстатів, холодильників та ін. Важливою перевагою віброобробки є висока стабільність результатів обробки всіх деталей однієї партії, що особливо важливо при обробці високоточних деталей.

Постановка завдань. Процес вібраційної обробки полягає в послідовному нанесенні по поверхні оброблюваних деталей великої кількості мікроударів, а також нанесенні великої кількості мікроподряпин по поверхні частинками робочого середовища. Основою процесу є механічне або механохімічне знімання дрібних частинок металу і його окислів з оброблюваної поверхні, а також вигладжування мікронерівностей поверхні за рахунок пластичного деформування частинками робочого середовища, які відтворюють в процесі роботи складні рухи.

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

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.

Викладення основного матеріалу. Робоче середовище являє собою квазіоднорідну рідко-текучу субстанцію з нелінійними характеристиками. При ударно-імпульсному навантаженні вібробункера робоче середовище змінює свої властивості. Для побудови теоретичної моделі повільного циркуляційного руху робочого середовища розглянемо основні його параметри стану. Закономірності руху розглянемо для різних випадків ударного навантаження. Ударні навантаження можуть здійснюватись за симетричною схемою, коли включені всі чотири електромагніти та за асиметричними схемами.

При одночасному включенні всіх чотирьох електромагнітів вібробункер буде рухатись в напрямку вісі z . В першому наближенні будемо вважати рух вібробункера синусоїдальним, відповідним синусоїдальній силі, що створюється електромагнітами. Ударне імпульсне навантаження на вібробункер відбувається при його взаємодії з упорами в точці 1 (рис. 1, в).

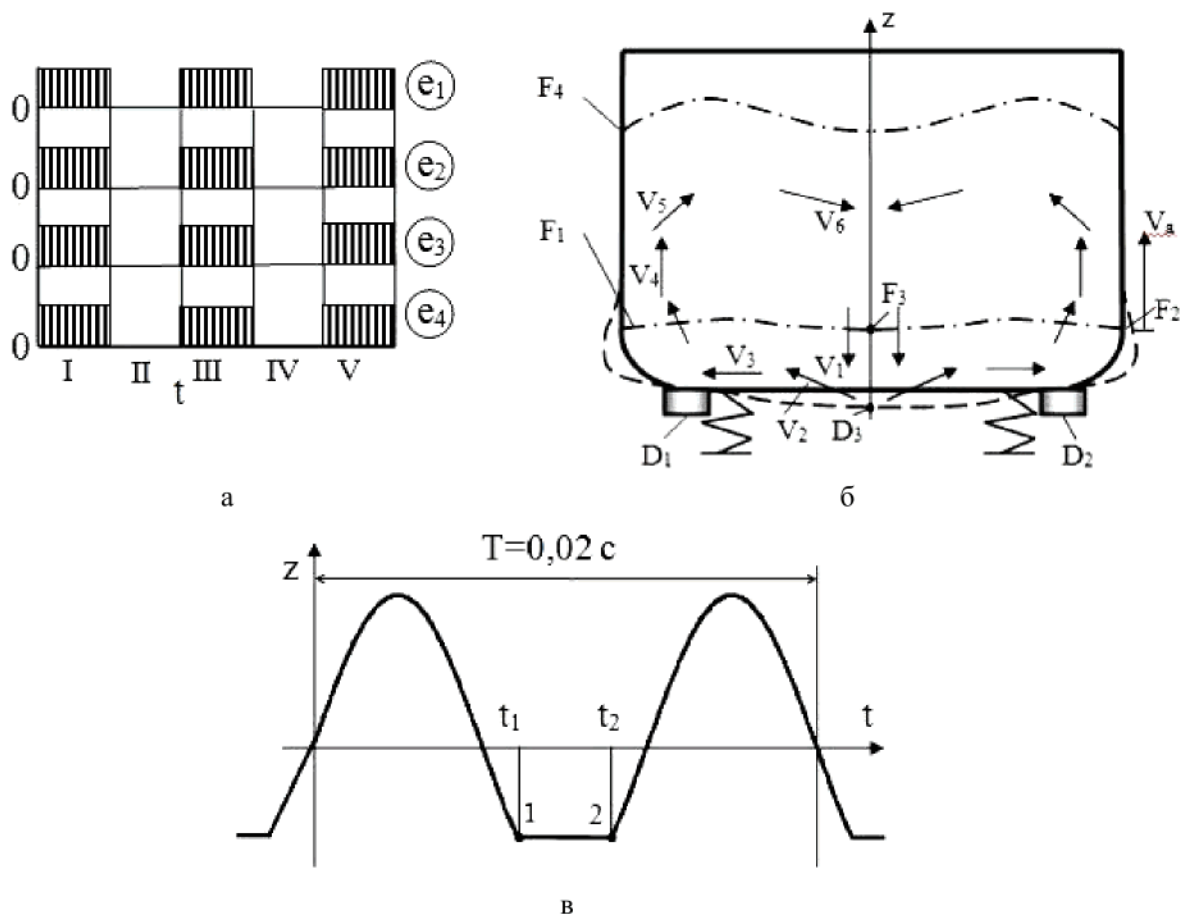


Рис. 1. Циклограма одночасного включення всіх чотирьох електромагнітів (а), схема руху вібробункера (б) та закон переміщення корпусу вібробункера (в) при його симетричному ударно-імпульсному навантаженні

Частота включення електромагнітів складає 50 Гц. Амплітуда переміщення 2..3 мм. При ході вібробункера вниз він взаємодіє з упорами і зупиняється. При цьому, в робочому середовищі виникають інтенсивні процеси імпульсного характеру (рис. 2).

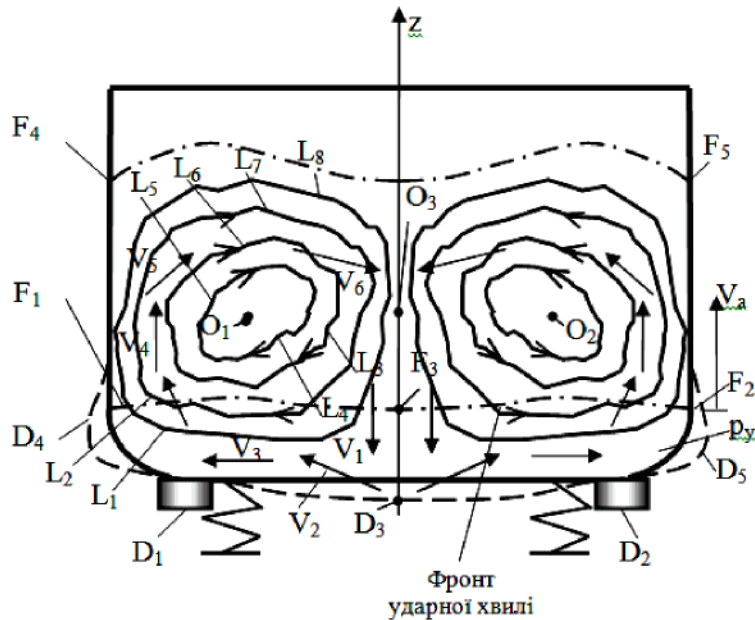


Рис. 2. Схема віссиметричного вертикального переміщення вібробункера та циркуляційний рух робочого середовища

При ударі точки D_1 , D_2 дна вібробункера взаємодіють з упорами і зупиняються. Робоче середовище і дно вібробункера рухаються по інерції. При цьому має місце пружна деформація дна вібробункера і він прогинається. Його точка D_3 рухається вниз під дією сил інерції дна та інерції середовища і зупиняється в стані динамічної рівноваги. При цьому гранули і деталі, які утворюють робоче середовище, зупиняються безпосередньо біля поверхні дна вібробункера. Еквівалентний тиск робочого середовища біля дна вібробункера підвищується на величину p_{y0} . Елементи робочого середовища, розташовані вище дна, рухаються за інерцією (по стрілці V_1), натискають на нерухомі елементи, розташовані біля дна, і гальмуються, підвищуючи тиск в області дна і розширюючи цю область. Утворюється ударна хвиля $F_1F_3F_2$. Фронт ударної хвилі рухається вгору із швидкістю ударної хвилі V_a . Фронт ударної хвилі $F_1F_3F_2$ не є плоским. Він викривлений по різним причинам. По-перше, за рахунок прогину дна вібробункера. По-друге, він викривлений за рахунок того, що робоче середовище в центральній частині ущільнюється (стискається) більше ніж біля бокових стінок. Частина робочого середовища біля стінок гальмується і утримується від стиску нерухомими стінками, тому ущільнення біля стінок менше ніж в центральній частині вібробункера.

Третьою причиною є деформації стінок вібробункера в радіальному напрямку (точки D_4D_5). Розширення вібробункера знижує еквівалентний тиск на периферії по відношенню до тиску в центрі. Це приводить до виникнення мікропереміщень елементів робочого середовища від центру до периферії. Переміщення показані стрілками V_2 і V_3 . Фронт ударної хвилі $F_1F_2F_3$ переміщується вгору по висоті вібробункера до тих пір, поки не досягне вільної поверхні робочого середовища. Вільна поверхня внаслідок проходження фронту дещо викривляється і набуває форми кривої $F_4F_5F_6$ (викривлення показано у збільшеному вигляді).

Переміщення елементів робочого середовища спричиняє циркуляційний рух, який формується у радіальних площинах. Еквівалентні лінії течії (траєкторії руху елементів) є замкнутими і являють собою кільцеві лінії, що мають нижні гілки L_1, L_2, L_3, L_4 та верхні гілки L_5, L_6, L_7, L_8 . Циркуляційний рух є повільним. Він охоплює весь об'єм робочого середовища. Циркуляційний рух має вигляд вихрового кільця з центром в точках O_1 та O_2 .

Таким чином, при ударно-імпульсному навантаженні вібробункера в робочому середовищі виникає вихровий циркуляційний рух, який охоплює тороподібну область. В центрі тороподібної області (точки O_1 та O_2) має місце фокус течії, де її поступальна швидкість близька до нуля.

Для розрахунку динамічних параметрів середовища при ударно-імпульсному навантаженні застосовуються основні положення теорії гідравлічного удару.

Час розповсюдження фронту ударної хвилі від дна вібробункера до вільної поверхні є фазою гідравлічного удару τ .

$$\tau = \frac{H}{v_a}, \quad (1)$$

де H – висота робочого середовища; v_a – швидкість ударної хвилі.

Підвищення тиску визначається із рівняння балансу енергії. При гідравлічному ударі кінетична енергія робочого середовища E_k переходить у потенціальну енергію стиску середовища E_{np} та потенціальну енергію деформованого дна стінок вібробункера E_{nm} . Таким чином, рівняння енергетичного балансу:

$$E_k = E_{nm} + E_{np} + E_\delta, \quad (2)$$

де E_δ – енергія, яка втрачається на опір середовища та на нелінійні деформаційні процеси в робочому середовищі.

Кінетична енергія середовища, що рухається із середньою швидкістю v_0 у вібробункері висотою H і радіусом r_0 , визначається формулою:

$$E_k = 0,5\rho\pi r_0^2 H v_0, \quad (3)$$

де ρ – середня еквівалентна густина робочого середовища, яке включає деталі і гранули абразиву.

Потенціальна енергія стисненого робочого середовища дорівнює роботі стиснення при дії ударної зміни тиску Δp_y і визначена як:

$$E_{np} = 0,5\rho\pi r_0^2 \Delta p_y \Delta H = 0,5\Delta p_y \Delta W, \quad (4)$$

де ΔH – зміна висоти робочого середовища;

ΔW – зміна об'єму робочого середовища.

Приймемо в першому наближенні, що зміна об'єму робочого середовища лінійно залежить від зміни тиску:

$$\Delta W = \frac{W\Delta p_y}{E_a}, \quad (5)$$

де W – об'єм робочого середовища;

E_a – середнє значення еквівалентного модуля пружності робочого середовища.

Визначаючи об'єм середовища як $W = \rho\pi r_0^2 H$, дістанемо вираз для потенціальної енергії стиснення робочого середовища:

$$E_{np} = \frac{0,5\rho\pi r_0^2 H (\Delta p_y)^2}{E_a}. \quad (6)$$

Потенціальна енергія деформації стінок вібробункера:

$$E_{nm} = 0,5\Delta p_y \rho\pi r_0 H \Delta r,$$

де Δr – деформація стінки вібробункера в радіальному напрямі.

Згідно закону Гука:

$$\Delta r = \frac{\sigma}{E},$$

де σ – нормальна напруга в матеріалі вібробункера; E – модуль пружності матеріалу стінок вібробункера.

Визначимо напругу як

$$\sigma = \frac{\Delta p_y r}{\delta},$$

де δ – товщина стінки вібробункера.

Потенціальна енергія деформації:

$$E_{nm} = \frac{\pi r^3 H}{\delta E} (\Delta p_y)^2 + E_{\delta n}.$$

$$E_{\text{дн}} = \frac{\pi r^3}{\delta E} K_o (\Delta p_y)^2$$

де $E_{\text{дн}}$ – потенціальна енергія дна вібробункера, K_o – коефіцієнт.

Підставимо значення енергій у рівняння енергетичного балансу і дістанемо:

$$0,5\pi r^2 H \rho V_0^2 = \frac{\pi r^2 (H + K_o)}{\delta E} (\Delta p_y)^2 + \frac{\pi r^2 H}{2E_a} (\Delta p_y)^2. \quad (7)$$

Значення ударного тиску:

$$\Delta p_y = \rho V_0 V_a, \quad (8)$$

де, $V_a = \sqrt{\frac{E_{\text{п}}}{\rho}}$ – швидкість розповсюдження ударної хвилі;

E_n – приведений модуль пружності вібробункера.

Швидкість розповсюдження гідроударної хвилі є невеликою і становить 50...100 м/с.

Підвищення тиску розраховується за наведеною формулою.

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що в реальних умовах розрахункові значення гідроударного підвищення тиску дещо менші (на 10...20 %) за експериментальні (рис. 3).

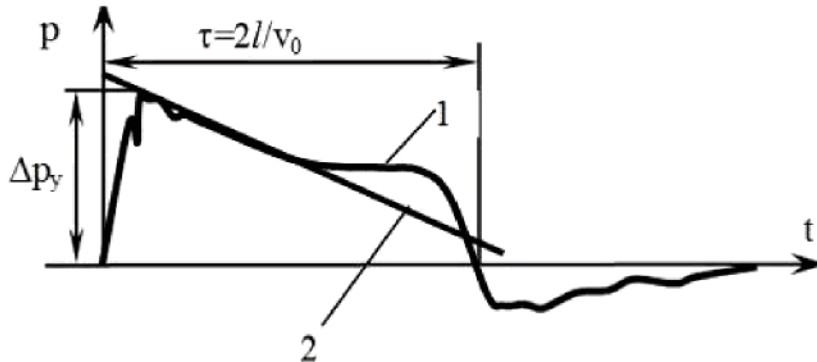


Рис. 3. Схематичний графік зміни гідроударного тиску у вібробункері при гідроударі

Сили опору в робочому середовищі є надзвичайно інтенсивними. Тому гідроударне підвищення тиску швидко зменшується. Запропоновано як перше наближення, що підвищення тиску в околиці дна вібробункера змінюється по трикутному закону (крива 2 на рис. 3).

Підвищення тиску спричинює циркуляційний рух робочого середовища. Напрямок цього руху встановлено раніше. Він направлений від середини дна вібробункера на його периферію (рис. 4).

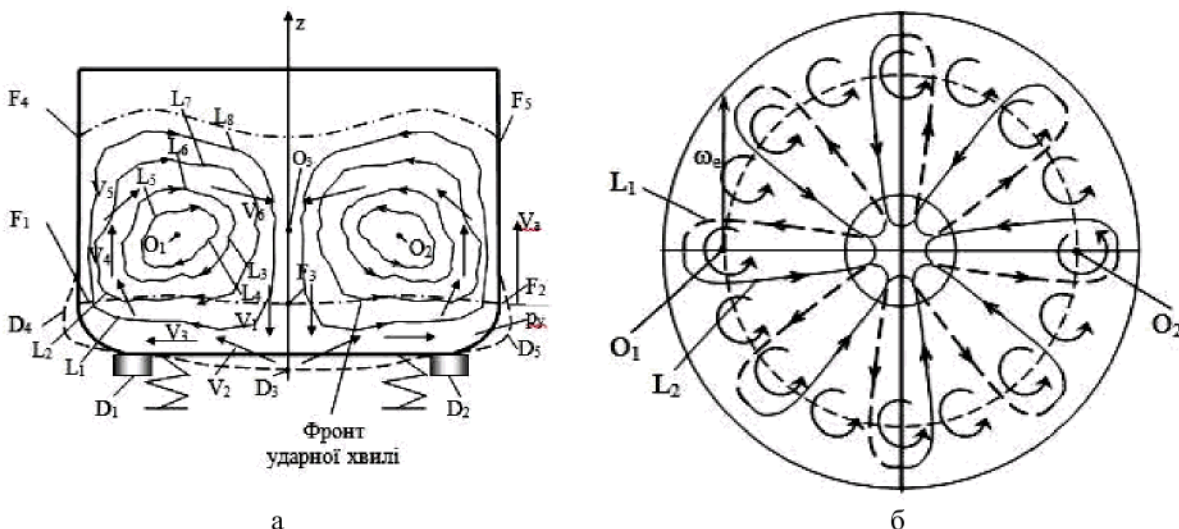


Рис. 4. Циркуляційний рух робочого середовища при симетричному ударно-імпульсному навантаженні: а – вигляд збоку; б – вигляд згори

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

Робоче середовище розповсюджується повільним циркуляційним потоком, для частини потоку відповідної лінії $O_1O_3O_2$ переміщення середовища відбувається під дією еквівалентного тиску. Прийнято, що еквівалентний тиск гідроудару становить $\frac{1}{2} p_y$. Даний тиск діє в проміжку часу $\Delta t_B = t_2 - t_1$ між точками 1 і 2 (див. рис. 1). При цьому, гідроудар діє в точці 1 і затухає в точці 2. Відповідно, еквівалентний тиск в околиці дна вібробункера складе:

$$p_{O1} = \frac{1}{2} p_y \cdot \frac{\Delta t_B}{T} \quad (9)$$

Під дією еквівалентного тиску на лінії $O_1O_3O_2$ має місце течія робочого середовища. Середня швидкість течії V_c буде визначатись перепадом тиску. В першому наближенні приймемо, що для лінії $O_1O_3O_2$ має місце рівняння Бернуллі. Прийнято, що швидкість на вході (в точці O_1) та виході (в точці O_3) однакова. Тоді рівняння Бернуллі набуде вигляду:

$$p_{O1} = \frac{\rho}{2} V_c^2 \cdot \xi \quad (10)$$

де ξ – коефіцієнт гідравлічних втрат.

Із даного рівняння визначено середню швидкість циркуляційного руху:

$$V_c = \sqrt{\frac{2}{\rho \xi} p_{O1}} = \sqrt{\frac{1}{\xi} \frac{\Delta t_B}{T} V_a V_0}.$$

Таким чином, середня швидкість визначається швидкістю удару V_0 та швидкістю ударної хвилі V_a . Підставивши значення величини, отримаємо:

$$V_c = \sqrt{\frac{1}{\xi} \frac{\Delta t_B}{T}} \sqrt{\frac{E_{II}}{\rho}} V_0. \quad (11)$$

Одержану залежність спростимо розкладом в ряд Тейлора і одержимо:

$$V_c = a_1 \frac{\Delta t_b}{T} + a_2 E_{II} - a_3 \rho + a_4 V_0, \quad (12)$$

де a_1 - a_4 – постійні, які будуть уточнені по результатам експериментів.

Вихровий циркуляційний рух приводить до повільного обертання маси робочого середовища. Профіль середніх швидкостей в радіальному перетині середовища описується параболічною залежністю. На осі вібробункера швидкість руху робочого середовища змінюється від нульового значення на поверхні та в центральній частині дна вібробункера до деякого максимального в центральній частині робочого середовища (точка O_3). Таким чином виникає тороподібний вихровий циркуляційний рух робочого середовища (рис. 4, б).

Інтенсивність циркуляційного руху оцінюється еквівалентною кутовою швидкістю ω_e , що характеризує повільне обертання робочого середовища.

Для оцінки кутової швидкості циркуляційного руху використано залежність:

$$\omega_e = \frac{V_c}{r_c}. \quad (13)$$

Вихрові рухи охоплюють весь об'єм робочого середовища.

Інтенсивність вихрового циркуляційного руху при симетричному ударному навантаженні є невеликою. Це пояснюється стабілізуючим впливом окремих вихорів, які є симетричними.

Більш інтенсивним є циркуляційний рух при несиметричному ударному навантаженні вібробункера (рис. 5).

При несиметричному навантаженні удар має місце з одного боку вібробункера (точка D_1). При цьому ударна хвиля F_1F_2 є несиметричною. Підвищення тиску біля дна вібробункера приведе до його деформації. Деформація буде несиметричною, найбільший прогин дна буде зміщено до точки удару. Крім статичних деформацій дна і стінок вібробункера в ньому виникають високочастотні коливання. Це знижує сили тертя елементів робочого середовища по поверхні вібробункера. Дно вібробункера нахилено під деяким кутом до напрямку руху частинок абразиву. Тому інерція робочого середовища спричиняє його переміщення в напрямку стінки (показано стрілкою V_1). Це є основною причиною формування інтенсивного циркуляційного руху робочого середовища. Додатковою причиною є проходження фронту ударної хвилі.

Розповсюджуючись по висоті вібробункера ударна хвиля доходить до поверхні робочого середовища за неоднаковий час. В місці удару ударна хвиля досягне поверхні (точка F_4), а з протилежного боку (точка F_5) вона буде знаходитись нижче поверхні робочого середовища. При цьому виникає перепад тиску, який спричинить переміщення робочого середовища в напрямку, показаному стрілкою V_2 .

Рух робочого середовища у напрямку стрілки V_3 спричинено гідроударними явищами, які розглянуті раніше. Для розрахунку параметрів циркуляційного руху застосовано інтегральні закони переносу, зокрема, теорему Ейлера про зміну кількості руху об'єму суцільного середовища [11].

$$\iiint_W \rho \vec{F} dW + \iint_{\sigma} \vec{p}_n d\sigma - \frac{\partial}{\partial t} \iiint_W \rho \vec{V} dW - \iint_{\sigma} \rho \vec{V} V_n d\sigma = 0 \quad (14)$$

де, ρ – поточна щільність робочого середовища в деякій точці; \vec{F} – вектор масових сил, що діють в робочому середовищі; W – контрольний об'єм робочого середовища, обмежений контрольною поверхнею σ ; \vec{p}_n – вектор сил тиску, що діють на елементи контрольної поверхні $d\sigma$; \vec{V} – вектор швидкості в точці робочого середовища; V_n – нормальна складова швидкості на контрольній поверхні, визначена в додатному напрямку.

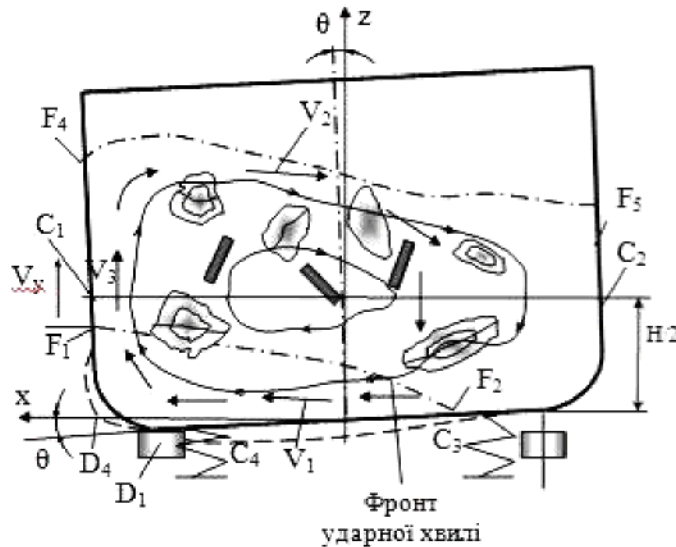


Рис. 5. Циркуляційний рух робочого середовища при несиметричному ударному навантаженні вібробункера

Виберемо контрольний об'єм у вигляді половини висоти робочого середовища. Він обмежений контуром C_1, C_2, C_3, C_4 (рис. 5) Для даного контрольного об'єму обчислено всі інтеграли, що входять у формулу (14). Масовою силою в даному об'ємі є гравітаційні сила. Тому, перший інтеграл визначено у вигляді

$$\iiint_W (\rho \vec{F}) dW = \iiint_W \rho g dW - \vec{k} \frac{M}{2} g, \quad (15)$$

де \vec{k} – орт вісі z системи координат; g – пришвидшення вільного падіння; M – загальна маса робочого середовища у вібробункері.

Гравітаційна сила діє вниз, тому вона направлена протилежно вісі z . Для обчислення другого інтегралу приймемо, що тиск в перетині C_1C_2 дорівнює нулю, а в перетині C_3C_4 дорівнює гідроударному тиску p_y .

В перетинах C_1C_4 та C_2C_3 тиск змінюється від нуля до p_y по однаковому закону. Відповідно, значення другого інтеграла сили тиску:

$$\iint_{\sigma} \vec{p}_n d\sigma = \vec{i} (p_y S_{\sigma} \cdot \sin \Theta + \tau_T S_{\sigma} \cdot \cos \Theta) + \vec{k} (p_y S_{\sigma} \cdot \cos \Theta + \tau_T S_{\sigma} \cdot \sin \Theta), \quad (16)$$

де S_Θ – площа дна, обмеження по діаметру точками C_3C_4 , τ_T – середнє значення напруження тертя на дні вібробункера; Θ – кут нахилу вібробункера; \vec{i}, \vec{k} – орти декартової прямокутної системи координат xz .

Напруження тертя наближено визначається формулою:

$$\tau_T = \frac{M/2}{S_0} \cdot \frac{S_\Theta}{S_\Theta} gf = \frac{Mgf}{2S_0}, \quad (17)$$

де S_0 – площа перетину вібробункера; f – коефіцієнт тертя робочого середовища по поверхні дна вібробункера.

Для обчислення третього інтегралу прийемо в якості припущення, що швидкість середовища змінюється від V_0 до нуля за час проходження ударної хвилі. Час проходження хвилі $t_y = \frac{H}{2V_y}$.

Відповідно

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_W \rho \vec{v} dW = -\vec{k} \frac{M}{2} \frac{V_0}{t_y} = -\vec{k} \frac{MV_0 2V_y}{2H} = -\vec{k} \frac{MV_0 V_y}{H}. \quad (18)$$

Інтеграл являє собою вектор, направлений вниз (прототип вісі z).

Для обчислення останнього інтеграла в формулі (14) прийемо, що циркуляційний рух найбільше інтенсивний в перетині контрольної поверхні C_1C_4 , яка відповідає фокусу вихрового руху. В останніх перетинах значення квадрата швидкості набагато менші і ними можна знехтувати. При цьому

$$\iint_\sigma \rho \vec{v} V_n d\sigma = \vec{i} \rho b \frac{H}{2} V_c^2, \quad (19)$$

де V_c – середня швидкість середовища в перетині C_1C_4 , b – еквівалентна товщина виділеного об'єму.

Підставимо значення інтегралів у векторну рівність (14) і одержимо:

$$\begin{aligned} & -\vec{k} \frac{Mg}{2} + \vec{i} \left(P_y S_\Theta \cdot \sin \Theta - \frac{Mgf S_\Theta \cos \Theta}{2S_0 f} \right) + \vec{k} \left(P_y S_\Theta \cdot \cos \Theta + \frac{Mgf S_\Theta \sin \Theta}{2S_0 f} \right) - \\ & -\vec{k} \frac{MV_0 V_y}{H} - \vec{i} \rho \frac{bH}{2} V_c^2 = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Із даної векторної рівності в проекціях на вісі координат одержимо систему рівнянь:

$$\begin{cases} -\frac{Mg}{2} + P_y S_\Theta \cdot \cos \Theta + \frac{Mgf S_\Theta \sin \Theta}{2S_0} - \frac{MV_0 V_y}{H} = 0 \\ P_y S_\Theta \cdot \sin \Theta - \frac{Mgf S_\Theta \cos \Theta}{2S_0} - \rho \frac{bH}{2} V_c^2 = 0. \end{cases} \quad (21)$$

Виключимо із даної системи невідому величину $P_y S_\Theta$. Для цього домножимо перше рівняння на $\sin \Theta$, а друге – на $(-\cos \Theta)$ і додамо рівняння. Одержимо:

$$-\frac{Mg}{2} \sin \Theta + \frac{Mgf \sin^2 \Theta}{2S_0} + \frac{MV_0 V_y \sin \Theta}{H} - \frac{Mgf \cos^2 \Theta}{2S_0 f} + \rho \frac{bH}{2} V_c^2 \cos \Theta = 0.$$

Із даного рівняння визначимо середню швидкість циркуляційного руху:

$$V_c = \sqrt{2\xi H \left[\left(\frac{g}{2} + \frac{V_0 V_y}{H} \right) \Theta - \frac{g}{2} \frac{S_\Theta}{S_0} f \right]} \quad (22)$$

де позначено $\xi = \frac{M}{\rho b H^2}$ і враховано $\cos \Theta \approx 1$, $\text{tg} \Theta \approx \Theta$.

Подамо середню швидкість у вигляді:

$$V_c = \sqrt{2g\xi H \left[\left(\frac{1}{2} + \frac{V_0 V_y}{gH} \right) \ominus - \frac{S_\theta}{2S_0} f \right]}. \quad (23)$$

Середня кутова швидкість циркуляційного руху складе:

$$\omega_c = \frac{4V_c}{H}. \quad (24)$$

Висновки. Сферичний рух вібробункера визначається законом включення електромагнітів і приводить до спірального руху вібробункера в усталених динамічних режимах. Перехідні процеси мають місце при включенні електромагнітів і проявляються у вигляді складних поперечно-кутових переміщеннях вібробункера. Перехідні процеси обумовлюють значні динамічні навантаження на робоче середовище.

Ударно-імпульсні навантаження на вібробункер приводять до виникнення повільного циркуляційного руху робочого середовища. Даний рух інтенсифікується при несиметричному ударному навантаженні. Циркуляційний рух має вигляд кільцевого або дугоподібного вихрового кільця, яке охоплює весь об'єм робочого середовища. Для визначення характеру вихрового руху допустимим є застосування закону зміни кількості руху в інтегральній формі для виділеного контрольного об'єму робочого середовища. Середня швидкість циркуляційного руху залежить від інтенсивності удару, швидкості вібробункера до удару та маси робочого середовища. Кутова швидкість вихрового руху пропорційна середній швидкості циркуляційного руху.

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.

Інформаційні джерела

1. Афтаназів І.С., Гавриш А.П. та ін. Підвищення надійності деталей машин поверхневим пластичним деформуванням. – Житомир: ЖІТІ, 2001. – 516 с.
2. Бабичев А.П. Вибрационная обработка деталей в абразивной среде. – М.: “Машиностроение”, 1986. – 132с.
3. Бабичев А.П. Конструирование и эксплуатация вибрационных станков для обработки деталей / А.П. Бабичев, Л.К. Зеленцов, Ю.М. Самодумский. – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского университета, 1981. – 160 с.
4. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии: Часть 2. Технология вибрационной обработки / А.П. Бабичев.-Ростов-на-Дону: ДГТУ, 1994. – 89 с.
5. Бабичев А.П. Технологические испытания абразивных гранул из шлифовального шлама (на полимерном связующем) / А.П. Бабичев, Н.С. Зинченко, О.К. Сикизова // Вопросы вибрационной технологии, 2006. – С 214–217.
6. Бабичев А.П. Физико-технологические основы методов обработки: учебное пособие для вузов / А.П. Бабичев. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2006. – 410 с.
7. Берник П.С. Аналіз конструкцій вібраційних технологічних полічастотних машин для оздоблювально-зміцнювальної обробки деталей / П.С. Берник, Л.В. Ярошенко, Р.М. Горбатюк // Вібрації в техніці та технологіях. – 2000. – №2(14). – С. 7–14.
8. Димов Ю.В. Управление качеством поверхностного слоя детали при обработке абразивными гранулами: автореф. дис. ... докт. техн. наук. / Ю.В. Димов. – Минск, 1987. – 35 с.
9. Карташов Г.Л., Власов О.А., Банатов С.В. Обработка деталей свободными абразивами у вибрируючих резервуарах. – К.: “Наукова думка”, 1975. – 378с.
10. Лубенская Л.М. Особенности шпиндельной обработки деталей в среде свободного абразива / Л.М. Лубенская, Е.В. Нечай, Г.Ю. Бурлакова // Вібрації в техніці та технологіях. – 2009. – №4(56). – С. 97–102.
11. Лойцянский Л.Г., Лурье А.И. Курс теоретической механики: в 2-х томах. Т 2. Динамика. – М.: Наука, 1983. – 640с.
12. Струтинський В.Б., Симонюк В.П., Денисюк В.Ю. Вдосконалення обладнання та процесу ударно-імпульсної обробки деталей у вібробункері: монографія. – Луцьк: СПД Гадяк Жанна Володимирівна друкарня “Волиньполіграф”^{ТМ}, 2016. – 139 с.

¹Струтинский В.Б., д.т.н., ²Симонюк В.П., к.т.н., ²Денисюк В.Ю., к.т.н.

¹Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

²Луцкий национальный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ МЕДЛЕННОГО ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ВИХРЕВОГО ДВИЖЕНИЯ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ В ВИБРОБУНКЕРА

В статье представлены результаты исследований закономерностей циркуляционного вихревого движения рабочей среды и перемещения корпуса вибробункера при его симметрической ударно-импульсной нагрузке. Установлено, что ударно-импульсные нагрузки на вибробункер приводят к возникновению медленного циркуляционного движения рабочей среды, которое интенсифицируется при несимметричной ударной нагрузке. Циркуляционное движение имеет вид кольцевого или дугообразного вихревого кольца, которое охватывает весь объем рабочей среды.

Для определения характера вихревого движения допустимым применением закона изменения количества движения в интегральной форме для выделенного контрольного объема рабочей среды. Средняя скорость циркуляционного движения зависит от интенсивности удара, скорости вибробункера к удару и массы рабочей среды. Угловая скорость вихревого движения пропорциональна средней скорости циркуляционного движения.

Ключевые слова: *вибрационная абразивная обработка, вибробункер, циркуляционное движение, электромагнит, абразивный материал, ударная волна.*

¹V. Strutynskyy, ²V. Denysiuk, ²V. Symonyuk

¹National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky»

²Lutsk National Technical University

INVESTIGATION OF SLOWLY CIRCULATING VORTEX MOTION IN THE WORKING ENVIRONMENT IN VIBROBUNKER

The article presents the results of investigations of the regularities circulation vortex motion of the working medium and the displacement of the body of the vibrating box with its symmetric shock-impulse load. It is established that shock-impulse loads on the vibrating box lead to the appearance of a slow circulation motion of the working medium, which is intensified with an asymmetrical impact load. The circulation movement has the form of an annular or arcuate vortex ring, which covers the entire volume of the working medium.

To determine the nature of the vortex motion, it is permissible to apply the law of change in the amount of motion in the integral form for the specified control volume of the working medium. The average speed of the circulation movement depends on the intensity of the impact, the velocity of the vibrating vibrator and the mass of the working medium. The angular velocity of the vortex motion is proportional to the average velocity of the circulation motion.

Keywords: *vibration abrasive treatment, vibrobunker, circulating movement electromagnet, abrasive material, the shock wave.*