

А.В. Міцик, канд. техн. наук, В.О. Федорович, д-р техн. наук
Харків, Україна

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВІБРАЦІЙНОЇ ОЗДОБЛЮВАЛЬНО-ЗАЧИЩУВАЛЬНОЇ ОБРОБКИ У РЕЗЕРВУАРАХ З МУЛЬТИЕНЕРГЕТИЧНИМ ВПЛИВОМ І РІЗНОЮ ФОРМОЮ ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ

Анотація. Дана сутність і ефективність процесу мультиенергетичної вібраційної оздоблювально-зачищувальної обробки. Зроблено припущення, що ефективність віброобробки залежить від інтенсивності руху завантаження резервуара відносно його робочих поверхонь. Встановлено, що факторами цього руху є форма поперечного перерізу резервуара та поле його коливань. Наведено опис і вибір параметрів фізичної та динамічної моделей для визначення поперечного перерізу резервуара.

Ключові слова: ефективність вібраційної обробки; багатоенергетичні технології; рух навантаження; фізична модель; динамічна модель; поперечний переріз пласта.

Віброверстати для оздоблювально-зачищувальної обробки деталей знаходять все більш широке промислове застосування. Тим часом теоретичне вивчення таких віброверстатів, незважаючи на появу в останні роки ряду досліджень, ще далеко від свого завершення. Це відноситься, зокрема до використання в технологіях віброобробки ефектів мультиенергетичного впливу на робоче середовище та оброблювані деталі.

При використанні мультиенергетичної технології передбачається ефект мультиелементного групового впливу на абразивне робоче середовище, поміщене в резервуар віброверстата з різною формою поперечного перерізу, що забезпечується за рахунок комбінування різних схем одночасного енергетичного впливу, як автономно рухомих робочих поверхонь резервуара, так і поверхонь складнопрофільних деталей, закріплених усередині резервуара на спеціальних пристроях. При цьому динамічний мультиелементний груповий вплив на робоче середовище здійснюється під впливом вібраційних вертикальних і горизонтальних сил, відцентрових сил, комбінованих вібраційних і відцентрових, а також гідравлічних сил [1].

В цілому експериментально встановлено, що застосування описаного ефекту підвищує інтенсивність процесу на операціях оздоблювально-зачищувальної віброобробки орієнтовно в 1,7 разів у порівнянні з традиційними технологіями.

Інтенсивність процесу вібраційної обробки залежить від ряду факторів і одним з основних серед них є інтенсивність руху завантаження, тобто робочого середовища та деталей, що визначається з одного боку, активним переміщенням деталей і гранул середовища відносно один одного, а з іншого їх порівняно повільним циркуляційним рухом щодо внутрішньої робочої поверхні резервуара.

До найбільш важливих факторів, які формують характер згаданого руху, слід віднести форму поперечного перерізу та поле коливань резервуара, яке визначається розташуванням його ділянок щодо віброзбуджувача.

Питання, пов'язані із з'ясуванням впливу форми поперечного перерізу на інтенсивність технологічного процесу віброобробки, побічно розглядалися в деяких роботах [2, 3]. Однак, в них не дається конкретних рекомендацій, тому в численних конструкціях виброверстатів застосовуються резервуари, що мають різні форми поперечного перерізу (рис. 1) [4].

Відомо, що зйом металу при віброобробці, тобто її продуктивність, забезпечується за рахунок відносного переміщення та взаємного тиску гранул робочого середовища і оброблюваних деталей, що відбуваються під впливом робочих поверхонь резервуара виброверстата [5].

У зв'язку з цим для оцінки ступеня впливу робочих поверхонь резервуара на інтенсивність переміщення завантаження в НДЛ «ОВА» СНУ ім. В. Даля була розроблена і досліджена фізична модель, що складається з двох резервуарів виготовлених з органічного скла в масштабі 1:10 з рівними об'ємами «U» – подібної, як найбільш широко застосовувана та «еліпсоподібної» ($K = 1,5$) формами поперечного перерізу. Резервуари монтувалися на одній площадці, яка жорстко закріплювалася на вібраторі спрямованої дії вібростенда ВЭДС-10 (рис. 2). В якості наповнювача використовувалися кольорові скляні кульки діаметром 2 мм.

Для створення нерухомої системи координат перед резервуаром встановлювалася нерухома рамка, не пов'язана з вібростендом, на яку були натягнуті дві взаємно перпендикулярні струни. Перетин струн приймався за початок координат. Частота коливань вибиралася 40 Гц, амплітуда – 0,5 мм. Значення амплітуди було вибрано з таких умов: отримати помітне для спостереження переміщення гранул середовища; зберегти прозорість торцевих стінок моделі; виключити руйнування моделей від дії робочого середовища [5].

Для фіксування механізму моделювання процесу застосовувалася швидкісна відеозйомка зі швидкістю, при якій одне коливання моделі захоплювало не менше 16 кадрів. Фактична швидкість зйомки становила 1000 ... 1100 кадрів в секунду, тобто 25 ... 27 кадрів за одне коливання.

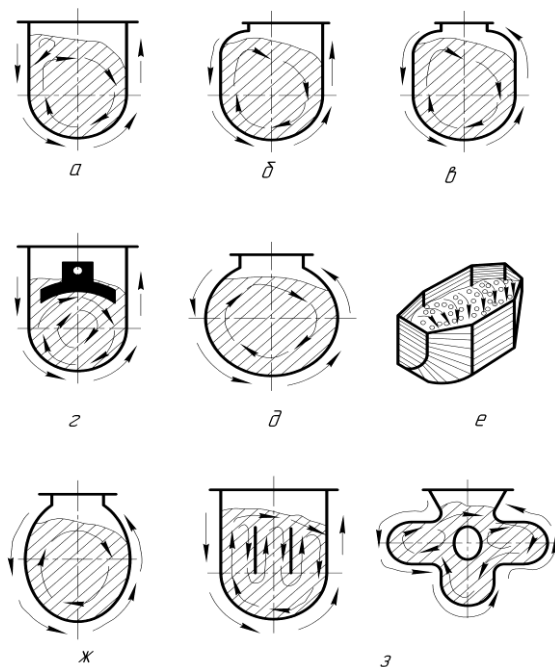


Рисунок 1 – Конструкції резервуарів виброверстата з різною формою поперечного перерізу: (а) – «U» – подібною; (б), (в) – «U» – подібною з округленою однією та двома вертикальними стінками; (г) – «U» – подібною з екраном-вставкою; (д) у вигляді кола; (е) зі змінним перерізом; (ж) «еліпсоподібною»; (з) з внутрішніми плоскими і об’ємними дефлекторами робочого середовища

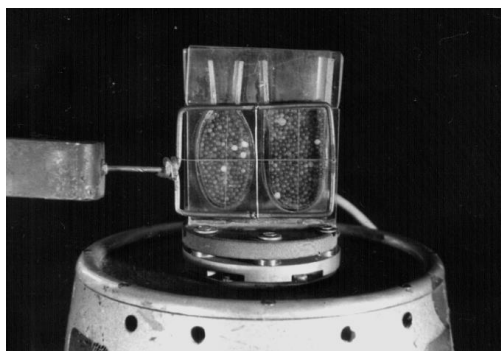


Рисунок 2 – Фізична модель резервуарів «U» – подібного та «еліпсоподібною» поперечного перерізу, змонтована на вібраторі вібростенда ВЭДС-10

На підставі покадрового вимірювання положення гранул на фотовідбитках, отриманих в результаті швидкісної відеозйомки, були побудовані графіки руху гранул, розташованих поблизу бічних стінок для «U» – подібного і «еліпсоподібного» резервуарів (рис. 3, а, б).

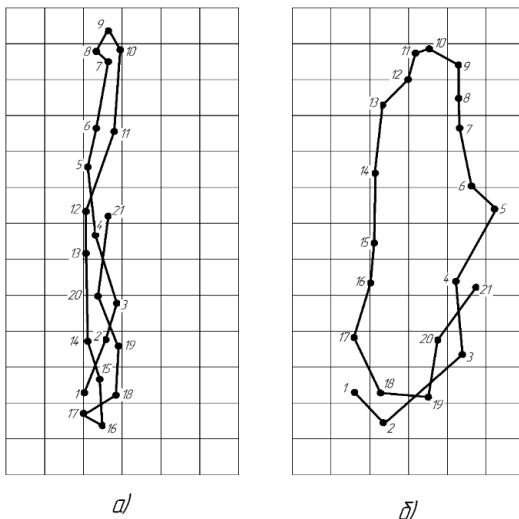


Рисунок 3 – Графіки руху гранул робочого середовища, розташованих біля бокової стінки резервуара: (а) – «U» – подібного; (б) «еліпсоподібного» поперечного перерізу

Аналіз графіків переміщення гранул наповнювача під впливом стінок резервуарів при строго вертикальних коливаннях вібростенда показав, що:

– для «U» – подібного резервуара (рис. 3, а) горизонтальне переміщення гранули за один період незначне і становить 6 % від вертикального;

– для «еліпсоподібного» резервуара (рис. 3, б) характерно значне горизонтальне переміщення гранули, що становить 34 % від його вертикального переміщення.

Отримані результати дозволяють стверджувати, що вплив стінок резервуара на робоче середовище, при інших рівних умовах в «еліпсоподібному» резервуарі відбувається більш інтенсивно.

Кількісна і якісна оцінка інтенсивності зйому металу визначалася зважуванням зразків до і після обробки в резервуарах з «U» – подібним та

«еліпсоподібним» поперечним перерізом. Умови обробки в обох випадках були ідентичні (табл. 1).

Таблиця 1 – Зйом металу в резервуарах з «U» – подібним і «еліпсоподібним» поперечним перерізом

№ з/п	«U» – подібний переріз			«Еліпсоподібний» переріз		
	вага до обробки, г	вага після обробки, г	зйом металу, г	вага до обробки, г	вага після обробки, г	зйом металу, г
1	91,7275	91,6766	0,0509	90,9484	90,8648	0,0836
2	91,8173	91,7643	0,0530	91,0236	90,9345	0,0891
3	91,6443	91,5920	0,0523	90,8473	90,7634	0,0839
4	92,1555	92,0754	0,0501	91,3238	9,2392	0,0846
5	92,1529	92,0995	0,0534	91,3635	91,2792	0,0843
<i>Середнє значення</i>			<i>0,0519</i>	<i>0,0851</i>		

Аналіз експериментальних даних дозволив зробити висновок, що зйом металу в «еліпсоподібному» резервуарі на 66 % більше в порівнянні з резервуаром «U» – подібного поперечного перерізу.

Таким чином, висновок, зроблений за результатами досліджень на фізичній моделі, отримав підтвердження в реальних умовах віброобробки. При цьому відмінність шорсткості зразків оброблених в «U» – подібному та «еліпсоподібну» резервуарі не спостерігалася. Середнє значення зразків після обробки в «U» – подібному резервуарі відповідало $R_a = 0,33$ мкм, в «еліпсоподібну» резервуарі – $R_a = 0,32$ мкм.

Також, в продовження роботи [6] була запропонована динамічна модель (рис. 4) циркуляційного руху завантаження резервуара віброверстата, яка дозволила отримати вираз для швидкості його циркуляції і оцінити діючі в ньому осереднені сили.

Завантаження в моделі розглядається як складова двох частин: периферійної, представленій у вигляді ланцюжка дискретних мас m , пов'язаних одна з одною вельми м'якими пружними елементами жорсткості C , які вільно лежать на внутрішній поверхні резервуара, і центральній, безпосередньо не взаємодіючій з поверхнею резервуара та лише надає чисто статичний тиск. Відношення маси периферійного шару до маси всього завантаження позначено через μ . Величина цього коефіцієнта приймається рівною 0,2 ... 0,3 і перевіряється експериментально.

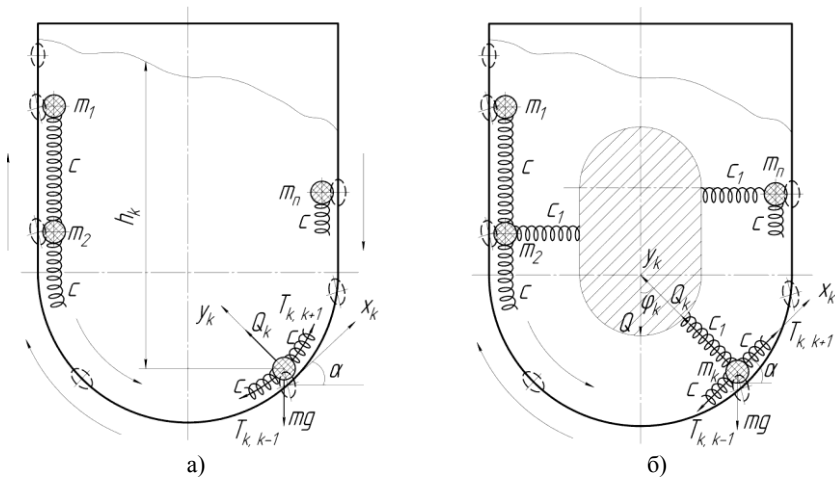


Рисунок 4 – Динамічна модель робочого середовища у резервуарі віброверстата: (а) – периферійна частина робочого середовища; (б) – центральна частина робочого середовища

Також наведено ділянку поверхні резервуара де взаємодія мас m показана за допомогою сил $T_{k-1,k}$ і $T_{k,k+1}$, а статичний тиск в центральній частині ототожнене з дією сили Q_k (рис. 5).

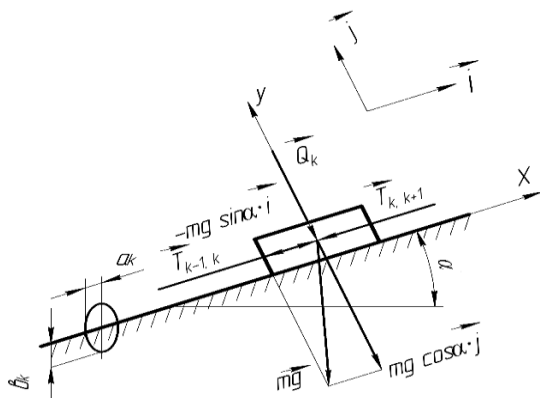


Рисунок 5 – Схема сил, що діють при переміщенні елемента завантаження у резервуарі віброверстата

При дослідженні моделі використані результати теорії вібропереміщення [7] та метод прямого поділу рухів, розвинений в роботі [8], які призводять до системи досить простих рівнянь для обчислення середньої швидкості циркуляції завантаження:

$$V = V_k^* + \frac{1}{V_k} (t_{k-1,k} - t_{k-1,k}), \quad (k = 1, \dots, n; t_{0,1} = t_{n,n+1} = 0), \quad (1)$$

$$V_k^* = a_k \omega \rho_k - \frac{g \sin \alpha_k}{V_k}, \quad v_k = \frac{\omega}{\pi n' (w_{0k}, R)} \cdot \frac{\lambda}{2 - \lambda},$$

$$w_{0k} = \frac{b_k \omega^2}{g \cos \alpha_k q_k}, \quad t_{k-1,k} = \frac{T_{k-1,k}}{m}, \quad q_k = \frac{Q_k}{m},$$

$$n'(w_{0k}, R) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} (\sqrt{w_{0k}^2 - 1} + \sqrt{w_{0k}^2 - 4}) & \text{при } R = 0; \\ \frac{1}{2\pi} \left[\frac{w_{0k} (1+R)}{1-R} + \sqrt{\frac{w_{0k}^2 (1+R)^4 - 4(1+R)^2}{(1-R)^2 (1+R)^2}} \right] & \text{при } R \neq 0. \end{cases}$$

$$\rho_k = \frac{\pi n(w_{0k}, R)}{w_{0k}} \cdot \frac{1-R}{1+R} \cos \varepsilon_k - \sqrt{1 - \left[\frac{\pi n'(w_{0k}, R)}{w_{0k}} \cdot \frac{1-R}{1+R} \right]^2} \sin \varepsilon_k,$$

де V_k^* – середня швидкість k -ої маси, яку вона мала б у відповідній точці резервуара при відсутності взаємодії з іншими масами, тобто при $T_{k-1,k} = T_{k,k+1} = 0$; a_k ; b_k – амплітуди коливань точок резервуара уздовж осей x і y (рис. 5); $T_{k-1,k}$ – сили взаємодії між масами; Q_k – сили тиску ядра; α_k – кут нахилу поверхні резервуара до горизонту в місці розташування k -ої маси; R – коефіцієнт відновлення швидкості при ударі; λ – коефіцієнт миттєвого тертя; g – прискорення вільного падіння; ω – кутова швидкість обертання валу віброзбуджувача; ε_k – зсув фаз складових коливань; $n'(w_{0k}, R)$ – число періодів переміщення ділянки резервуара між моментами контакту маси, що переміщається з резервуаром.

В результаті складання рівнянь (1) після простих обчислень можна знайти вирази для шуканої швидкості і відносних усереднених сил тиску між

$$\text{масами } t_{k-1,k} = \frac{T_{k-1,k}}{m} :$$

$$V = \frac{\sum_{k=1}^n v_k V_k^*}{\sum_{k=1}^n V_k}, \quad t_{k-1,k} = \sum_{j=1}^{k-1} (V_j^* - V) v_j. \quad (2)$$

Як видно з виразу (1), модель враховує вплив на швидкість циркуляції і діючі сили як неоднорідності поля коливань, так і форми поперечного перерізу резервуара вібростата.

За наведеними формулами (2) за допомогою ПК були виконані розрахунки швидкостей циркуляції завантаження та сил взаємодії для чотирьох видів форм поперечного перерізу резервуарів (рис. 6). Ці розрахунки дозволили визначити залежність V і $t_{k-1,k}$ від деяких параметрів руху завантаження – коефіцієнтів R і λ , величини відношення маси периферійного шару до маси всього завантаження, щільності завантаження, амплітуд і частоти коливань.

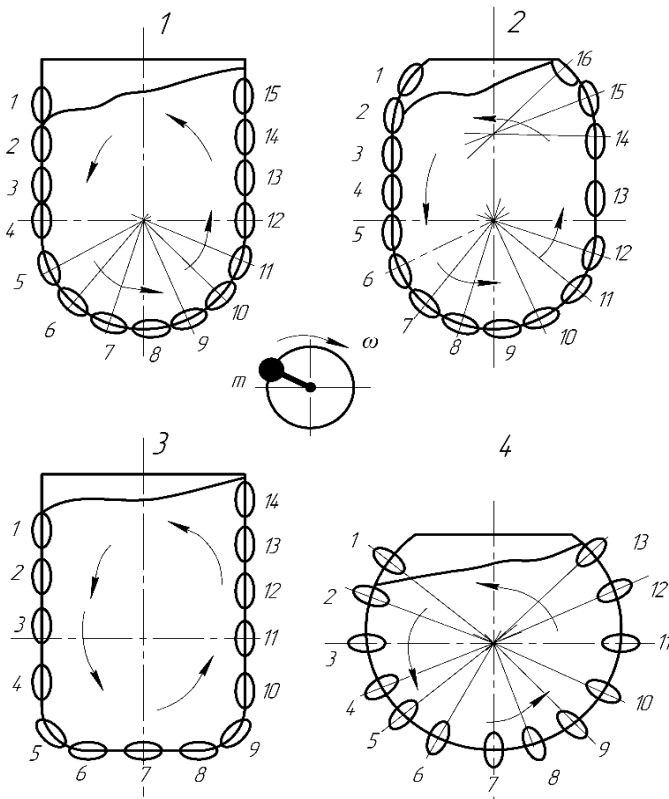


Рисунок 6 – Форми поперечного перерізу резервуара та еліптичні траєкторії коливань точок його перерізу

З метою перевірки відповідності запропонованої моделі результати обчислень були зіставлені з результатами експериментів по визначенню осередненої швидкості руху завантаження у резервуарі виброверстата.

Експериментальне визначення швидкості проводилося за допомогою спеціального пристрою, що складається з лопатей, закріплених в опорах на поворотній вісі, які, в свою чергу, кріпляться в пластинах жорсткої рамки. Пристрій вільно занурюється в масу завантаження, яке, переміщуючись, обертає лопаті з певною швидкістю.

Значення середніх швидкостей циркуляційного руху завантаження, обчислені відповідно до моделі та отримані експериментально для чотирьох розглянутих форм поперечних перерізів резервуара (табл. 2).

Розрахунок значення швидкості був проведений при наступних параметрах моделі: коефіцієнт відновлення $R = 0,1$; значення коефіцієнта миттєвого тертя $\lambda = 0,4$; відношення маси периферійного шару до маси всієї завантаження $\mu = 0,2$ і $\mu = 0,3$.

Аналіз табличних даних показує, що при адекватність розрахункових і експериментальних значень виходить цілком задовільною, а при розбіжність знаходиться в межах 15 – 30 %.

З таблиці також видно, що на швидкість циркуляційного руху завантаження, а, отже, і на ефективність процесу істотно впливають форма поперечного перерізу і поле коливань резервуара.

Розроблена модель дозволяє вибрати форму поперечного перерізу і поле коливань резервуара, де були б виконані рекомендації щодо величини швидкості циркуляційного руху завантаження і діючих в ньому сил. Однак відомо, що на інтенсивність віброобробки також впливають і такі параметри процесу, як кількісний і якісний склад хімічно-активного робочого розчину та фізико-технологічні характеристики абразивного наповнювача. Тому для вирішення основного завдання, що складається в експериментальному визначенні форми поперечного перерізу та поля коливань резервуара на інтенсивність процесу віброобробки попередньо за допомогою статистичних методів, встановлювалися значення цих параметрів в умовах обробки реальних деталей з латуні ЛС59 ГОСТ 2060-90.

При певному складі хімічно-активного розчину і характеристиці абразивного наповнювача проведені експериментальні дослідження по визначенню інтенсивності зміни шорсткості поверхні оброблених деталей, побудовані графічні залежності відносної зміни шорсткості поверхні від часу обробки у резервуарах чотирьох видів форм поперечного перерізу (рис. 7).

Таблиця 2 – Середні швидкості циркуляційного руху завантаження

Вид форми поперечного перерізу резервуара	Частота коливальн резервуара, Гц	Середня швидкість руху завантаження, см/с		
		обчислена відповідно до моделі при		отримана експериментально
		$\mu = 0,2$	$\mu = 0,3$	
«U» – подібна	36,6			
	38,2	50,0	34,2	38,4
	39,8	50,1	34,7	40,6
	41,4	50,3	35,3	41,0
	42,9	50,6	36,0	42,4
«Еліпсоподібна»	36,6			
	38,2	52,4	39,2	37,6
	39,8	52,4	39,4	39,0
	41,4	52,6	39,6	41,0
	42,9	52,7	39,9	43,4
«Прямокутна» із закругленими переходами від днища до стінок	36,6	66,0	55,9	51,0
	38,2	66,6	56,9	51,4
	39,8	67,3	58,0	50,2
	41,4	69,1	59,1	59,4
	42,9	69,4	60,2	54,5
У вигляді «кола»	36,6	50,5	36,3	39,4
	38,2	50,6	36,4	39,6
	39,8	50,6	36,4	40,2
	41,4	50,7	36,6	41,0
	42,9	50,8	36,9	40,0

При порівнянні активності обробки і характеру зміни шорсткості поверхні видно, що продуктивність «прямокутного» і «еліпсоподібного» резервуарів вище ніж резервуарів «U» – подібного та «круглого» перерізів. Ця тенденція характерна для розглянутих режимів коливальн. При зіставленні результатів експериментів з розрахунковими параметрами руху завантаження можна говорити про придатність запропонованої динамічної моделі для дослідження віброобробки деталей.

В роботі [9] зазначається, що ефективність вібраційної оздоблювально-зачищувальної обробки тим вище, чим вище швидкість циркуляції завантаження та менше діючі в ньому сили. Такі режими руху завантаження, як показали дослідження динамічної моделі, можуть бути забезпечені в резервуарах саме «еліпсоподібного» і «прямокутного» із закругленими переходами від днища до стінок форм поперечних перерізів. При цьому необхідно зазначити, що незначні за своїми розмірами радіусні заокруглення

стінок, необхідні для ліквідації мертвих зон в русі маси завантаження, не наближають «прямокутну» форму перерізу до форми «еліпса» або «кола».

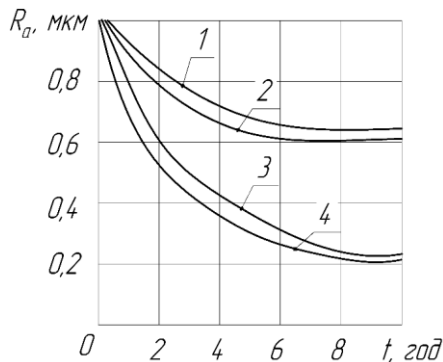


Рисунок 7 – Зміни шорсткості обробленої поверхні в залежності від форми поперечного перерізу резервуара виброверстата: 1 – «U» – подібна; 2 – «еліпсоподібна»; 3 – «прямокутна» із закругленими переходами від днища до стінок; 4 – у вигляді «кола»

Дослідження динамічної моделі дозволяють зробити висновок, що форма поперечного перерізу і поля коливань резервуара впливають на швидкість циркуляційного руху його завантаження та величини діючих в завантаженні сил, що безпосередньо позначається на ефективності процесу віброобробки.

Розрахунок і експериментальне визначення середніх швидкостей циркуляції завантаження в залежності від форми поперечного перерізу резервуара показали, що найбільше значення швидкості приймає у резервуарі «прямокутної» із закругленими переходами від днища до стінок форми перерізу, які не змінюють геометрію перерізу, а тільки виключають застій рухомого завантаження. У резервуарі цієї форми поперечного перерізу діючі в завантаженні сили приймають найменше значення.

Зіставлення інтенсивності зміни шорсткості поверхні деталей, оброблених в резервуарах досліджених форм поперечного перерізу з параметрами руху завантаження, розрахованими відповідно до динамічної моделі, показують, що інтенсивність зміни шорсткості поверхні тим вище, чим вище величина швидкості циркуляції завантаження і менше діючі в завантаженні осередненні сили. Такі режими реалізуються в резервуарах, що мають «прямокутний» і «еліпсоподібний» переріз.

Для оздоблювальних операцій при вібраційній оздоблювально-зачишувальній обробці деталей слід використовувати резервуари, що мають

«прямокутний» із закругленими переходами від днища до стінок і «еліпсоподібний» поперечний переріз.

Список використаних джерел: 1. *Мицьок А.В.* Пути интенсификации вибрационной отделочно-защитной обработки комбинированием схем энергетических воздействий на рабочую среду и детали / *А.В. Мицьок, В.А. Федорович* // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2011. – № 6 (83). – С. 26 – 34. 2. *Малкин Д.Д., Коноплинников Ю.А.* Исследование процесса объемной вибрационной обработки. – Тез. докл. научн.-техн. Семинара «Вибрационное шлифование, отделка, упрочнение». Ростов-на-Дону, 1969, с. 68 – 79. 3. *Самодумский Ю.М., Юркевич В.Б., Левин И.Н., Трунин В.Б.* О выборе рациональной формы рабочей камеры при вибрационной обработке. – В кн.: *Станки и резание металлов*. Ростов-на-Дону, 1974, с. 126 - 134. 4. *Бабичев А.П.* Основы вибрационной технологии / *А.П. Бабичев, И.А. Бабичев*. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2008. – 694 с. 5. *Медяник В.А.* Исследование эффективности процесса виброобработки в зависимости от некоторых технологических параметров виброустановок: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Виктор Александрович Медяник. – М., 1988. – 189 с. 6. *Левенгарц В.Л.* Исследование динамики и совершенствования устройств для вибрационной обработки деталей: дис. ... кандидата техн. наук: 05.02.08 / Виктор Львович Левенгарц. – Каунас, 1981. – 186 с. 7. *Блехман И.И., Джанелидзе Г.Ю.* Вибрационное перемещение. М., 1964, 412 с. 8. *Блехман И.И.* Метод прямого разделения движения в задачах о действии вибрации на нелинейные механические системы. – Изв. АН СССР Механика твердого тела. 1976, № 6, с. 13 – 27. 9. *Дьяченко В.И.* Исследование процесса виброабразивной обработки. – В кн.: *Прогрессивные методы отделочной обработки деталей машин*. Ростов-на-Дону, 1968, с. 32 – 48.

Andriy Mitsyk, Volodymyr Fedorovych, Kharkiv, Ukraine

EVALUATION OF VIRTUAL EFFICIENCY APPARATUS AND WELFARE PROCESSING IN RESERVOIRS WITH MULTENERGY IMPACT AND DIFFERENT FORM OF TRANSFER PERIPHERALS

Abstract. *The nature and effectiveness of the process of multi-energy vibration finishing and grinding treatment is given. The assumption is made that the effectiveness of vibration processing depends on the intensity of the movement of the reservoir loading, relative to its working surfaces. It has been established that the factors of this movement are the cross-sectional shape of the reservoir and the field of its oscillations. A description and selection of the parameters of the physical and dynamic models of the process for determining the cross-section of the reservoir is given. The study of the dynamic model allows us to conclude that the shape of the transverse cut and the oscillation fields of the reservoir affect the speed of the circulating movement of its load and the magnitude of the forces acting in the load, which directly affects the efficiency of the vibrating process. It has been established that the greatest importance is the speed in the tank "rectangular" with rounded transitions from the bottom to the walls of the overcut shape, which do not change the cut geometry, but only exclude the stagnation of the mobile load. In a reservoir of this cross-cut shape, the forces acting in the load take the least value. Comparison of the intensity of changes in the roughness of the surface of parts treated in tanks of the studied cross-cut shapes with the parameters of the load movement calculated according to the dynamic model shows that the intensity of the surface roughness changes the higher the higher the circulation rate and the smaller the effective forces acting in the load. Such modes are implemented in tanks that have a "rectangular" and "ellipsoid" cut. For finishing operations in vibratory finishing of parts, it is necessary to use tanks that have a "rectangular" with rounded transitions from the bottom to the walls and an "ellipsoid" transverse overcut.*

Keywords: *vibration treatment efficiency; multi-energy technologies; loading movement; physical model; dynamic model; reservoir cross-section.*