

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.924.7

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/02>

Залюбовський М.Г.

Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»

Панасюк І.В.

Київський національний університет технологій та дизайну

Малишев В.В.

Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»

ПЕРСПЕКТИВНІ ГАЛТУВАЛЬНІ ТА ЗМІШУВАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ В МАШИНІ ТИПУ TURBULA

Під час виконання галтувальних технологічних процесів, а також процесів змішування сипких дрібнодисперсних речовин використовують обладнання з ємкостями, які мають різний характер руху. Сьогодні здебільшого відоме використання вібраційних машин, машин з обертальним рухом робочих ємкостей, а також машин роторного та шпindelного типів. Однак такі типи обладнання створюють низьку інтенсивність переміщення сипкого робочого середовища всередині ємкостей, що призводить до зниження продуктивності виконання відповідних технологічних операцій та водночас до збільшення енергозатрат. Машини з обертальним рухом робочих ємкостей вважаються застарілим типом обладнання, тривалість виконання галтувальної технологічної операції може досягати 48 годин безперервної роботи такої машини. Доведено, що для технологічних операцій змішування сипких дрібнодисперсних речовин, а також для галтувальних технологічних операцій більш раціонально використовувати машини зі складним просторовим рухом робочих ємкостей типу Turbula. Установлено, що під час завантаження двох фракцій сипких дрібнодисперсних речовин до робочої ємкості, яка виконує складний просторовий рух, слід використовувати поперечну модель завантаження. Час, що витрачається на галтувальні технологічні операції полірування поверхні полімерних деталей, можна скоротити майже у два рази, а час, що витрачається на відділення металевих деталей від ливників, – у понад десять разів. Установлено взаємозв'язок між зміною режимів руху сипкого робочого середовища всередині ємкостей, які виконують складний просторовий рух, та інтенсивністю виконання відповідних технологічних операцій. Доведено, що для реалізації відділення металевих деталей від ливників та процесів змішування сипких дрібнодисперсних речовин слід забезпечити водоспадний режим руху сипкого робочого середовища, для реалізації процесів полірування поверхні полімерних деталей – змішаний режим руху.

Ключові слова: змішування, галтувальні технологічні процеси, сипкі дрібнодисперсні речовини.

Постановка проблеми. Для реалізації галтувальних технологічних процесів, а також процесів змішування сипких дрібнодисперсних речовин використовують обладнання з рухомими ємкостями, що мають різний характер руху. До таких типів обладнання відносяться машини з обертальними ємкостями, вібраційними ємкостями, роторні та шпindelні машини, машини зі складним просторовим рухом робочих ємкостей тощо.

Вібраційні, а також машини з обертальним ємкостями є застарілим типом обладнання, інтенсивність руху технологічного середовища у ємкостях досить низька, щоб забезпечити високу

продуктивність виготовлення деталей чи швидке змішування сипких дрібнодисперсних речовин.

Попередніми дослідженнями [1, с. 172] доведено, що найбільшій продуктивності під час виконання відповідних технологічних операцій можна досягнути за використання машин зі складним просторовим рухом робочих ємкостей, зокрема це може бути обладнання з конструкцією типу Turbula, яка була розроблена у 1966 р. швейцарською фірмою Willy A. Bachofen (WAB) [2]. У подальшому будемо називати цю конструкцію «базова». Авторами були розроблені різноманітні модифікації базової конструкції типу Turbula,

що мають відмінні конструктивні особливості та різне технологічне призначення.

Відомі різні підходи до дослідження процесів змішування та обробки деталей у машині типу Turbula. Однак, незважаючи на проведені дослідження, дотепер відсутні загальні уніфіковані підходи та рекомендації щодо впливу режимів обробки, а також конструктивних особливостей машини на інтенсивність та продуктивність під час виконання вищезгаданих технологічних операцій. У науковій літературі досить обмежена кількість робіт із даної тематики, і це потребує уніфікації з подальшим узагальненням та систематизацією різних літературних джерел.

Постановка завдання. Мета даної роботи – уніфікація з подальшим узагальненням та систематизацією попередніх результатів наукових досліджень щодо перспективних галузевих та змішувальних технологічних процесів у машинах зі складним просторовим рухом робочих ємкостей типу Turbula.

Виклад основного матеріалу дослідження. Базова конструкція машини типу Turbula зі складним просторовим рухом робочої ємкості являє собою просторовий шестиланковий механізм з обертальними кінематичними парами. Кінематичну схему просторового механізму базової конструкції механізму машини та її модель, створену за допомогою САПР SolidWorks, представлено на рис. 1 а та б відповідно.

Машина містить станину (1), ведучий (2) та ведений (6) вали, встановлені в станині паралельно в одній площині та з'єднані між собою подвійним просторовим шарніром, що виконаний у вигляді ведучого шатуна (3), веденого шатуна (5) та проміжного шатуна (4), закріпленого між веду-

чим (3) та веденим (5) шатуном на діаметрально взаємно перпендикулярних геометричних осях (7) та (8) відповідно. Рухомі ланки машини утворюють собою просторовий механізм з обертальними кінематичними парами А, В, С, D, E, F.

Технологічні процеси змішування сипких дрібнодисперсних речовин у ємкості, що виконує складний просторовий рух. Процеси змішування сипких дрібнодисперсних речовин широко застосовуються у різних галузях промисловості: хімічній, фармацевтичній, легкій тощо.

Відомо [3, с. 120–145], що для оцінювання якості змішування двох фракцій дрібнодисперсних речовин застосовують індекс сегрегації S , який може бути в діапазоні $0 \leq S \leq 2$. Для випадкових сумішей його значення приймають рівним одиниці: $S = 1$. По обидві боки від значення $S = 1$ будуть нестійкі стани сегрегації. За $S = 0$ – це ідеально змішана система, $S = 1$ відповідає відокремленим фракціям двох сипких речовин.

У роботі [4, с. 220–225] на основі визначення коефіцієнту дисперсії експериментально досліджувалися дві можливі моделі завантаження сипких дрібнодисперсних речовин до циліндричної робочої ємкості – осьову та поперечну (рис. 2) за різних кутових швидкостей ведучого валу машини (2,4 рад/с, 4,8 рад/с та 7,2 рад/с).

Після аналізу результатів експериментального дослідження, які виконані у роботі [5, с. 19–21], було встановлено, що найменша ефективність змішування за обох моделей завантаження буде за кутової швидкості ведучого валу в 4,8 рад/с. У цілому інтенсивність змішування змінювалася нелінійно залежно від кутової швидкості ведучого валу. Кількість обертів ведучого валу, яка необхідна для досягнення повного змішування,

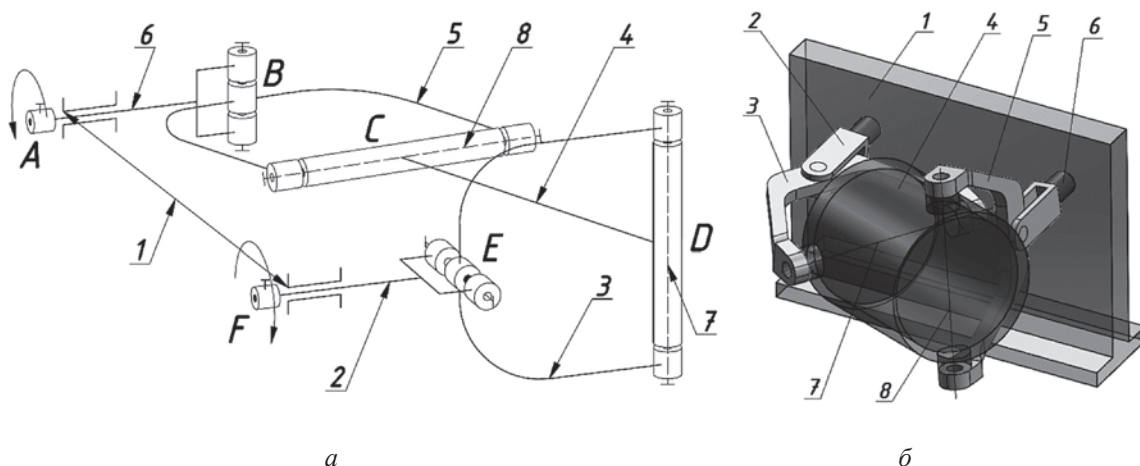


Рис. 1. «Базова» конструкція машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості типу Turbula: а – кінематична схема, б – модель машини

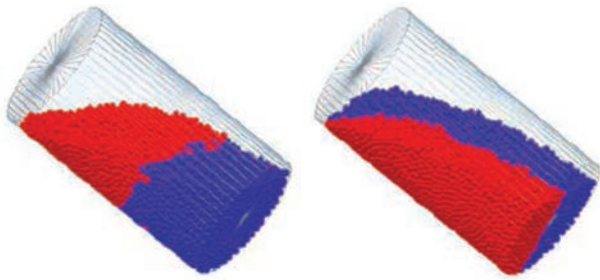


Рис. 2. Моделі завантаження сипких дрібнодисперсних речовин до циліндричної робочої ємкості: а – осьова, б – поперечна

спочатку збільшувалася зі збільшенням кутової швидкості, а потім зменшувалася. Також було доведено, що раціональною моделлю завантаження декількох фракцій сипких речовин до робочої ємкості є поперечна. У разі використання осьової моделі завантаження технологічний процес змішування відбувається менш інтенсивно майже у два рази.

У роботі [6, с. 250] було встановлено оптимальний рівень заповнення робочої ємкості сипким середовищем, що забезпечує найбільш інтенсивне виконання як процесів змішування сипких дрібнодисперсних речовин, так і інших галтувальних технологічних процесів. Такий оптимальний рівень заповнення варіюється в межах 50–70% від загального об'єму ємкості. Даний рівень заповнення, з одного боку, достатній для забезпечення відносно руху сипкого середовища всередині ємкості, а з іншого – дає змогу досягнути значної продуктивності виконання відповідної технологічної операції.

У роботі [7, с. 544–545] було доведено ефективність використання базової конструкції машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості типу Turbula порівняно з іншими типами обладнання. Результати експериментальних досліджень показали, що для досягнення задовільного індексу сегрегації двох фракцій сипких дрібнодисперсних речовин достатньо лише 20–30 обертів ведучого валу даної машини, що за частоти обертання ведучого валу у 2,4 рад/с можна досягнути за менш ніж дві хвилини роботи машини. Із використанням будь-якого іншого типу машин із рухомими

ємкостями, що використовуються для змішування сипких речовин, неможливо було досягнути подібного результату.

Галтувальні технологічні процеси поліпшення якості поверхні полімерних виробів у ємкості, що виконує складний просторовий рух. До таких галтувальних технологічних процесів слід відносити шліфування та полірування поверхні виробів. Уперше були проведені експериментальні дослідження [8, с. 25–30] щодо полірування поверхні поліефірних заготовок із використанням базової конструкції галтувальної машини типу Turbula. Зокрема, визначали вплив режимів руху робочого середовища всередині ємкості на інтенсивність та якість обробки поліефірних деталей під час реалізації водоспадного, каскадного та змішаного режимів руху робочого середовища за заповнення ємкості на 40% від її загального об'єму. Окрім самих оброблених деталей, робоча ємкість була заповнена абразивним матеріалом у вигляді керамічних трьохгранних призм та пемзою дрібнозернистості у необхідному співвідношенні [9, с. 30–31], увесь уміст заливався водою без особливих характеристик нижче насипного об'єму ємкості.

Для кожного режиму руху загальний час обробки становив 42 години. Якість обробки деталей оцінювали на основі визначення шорсткості їхньої поверхні. Машина зупинялася сім разів, зразки деталей виймалися на 6-й, 9-й, 14-й, 21-й, 24-й, 32-й та 42-й годинах обробки, так було отримано сім зразків деталей для кожного режиму руху. Шорсткість поверхні даних зразків, а також двох необроблених заготовок та двох контрольних зразків визначалася за двома параметрами: середнім арифметичним відхиленням профілю R_a та найбільшою висотою нерівностей профілю R_{max} . Кожен вимір параметру шорсткості на одному гудзику був продубльований сім разів. Фото необробленої заготовки, а також деталей, що пройшли відповідний час обробки, представлено на рис. 3. Графік залежності зміни шорсткості поверхні R_a полімерних деталей від часу обробки представлений на рис. 4, а графік залежності зміни шорсткості поверхні R_{max} полімерних деталей від часу обробки – на рис. 5.



Рис. 3. Фото необробленої заготовки, а також деталей, що пройшли відповідний час обробки

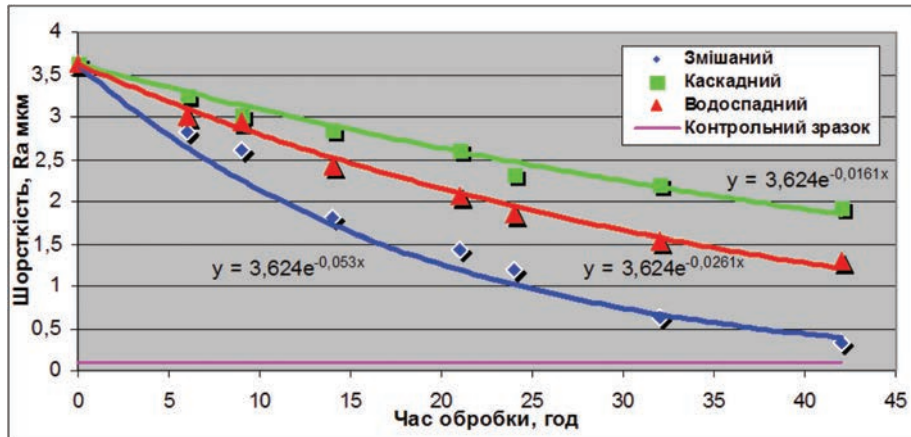


Рис. 4. Графік залежності зміни шорсткості поверхні R_a полімерних деталей від часу обробки

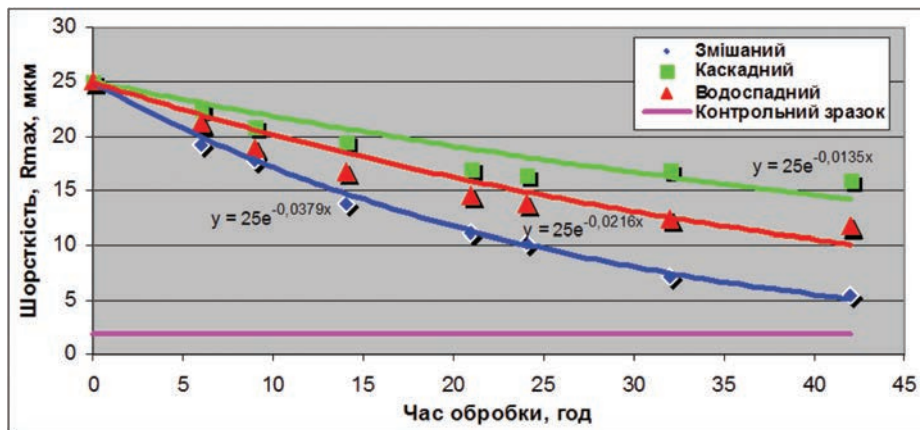


Рис. 5. Графік залежності зміни шорсткості поверхні R_{max} полімерних деталей від часу обробки

Проаналізувавши графіки залежності, що представлені на рис. 4 та рис. 5, встановлено, що найбільша інтенсивність полірування деталей відбувається під час реалізації змішаного режиму руху, менш інтенсивно обробка відбувалася за водоспадного режиму руху та найменша – за каскадного. Також було встановлено [10, с. 14–15], що обробка деталей у базовій конструкції машини типу Turbula потребуватиме у півтора-два рази менше технологічного часу, ніж під час виконання аналогічної технологічної операції з використанням машин з обертальним рухом робочої ємкості.

Для ще більшої інтенсивності виконання технологічної операції шліфування чи полірування полімерних деталей рекомендовано застосовувати робочі ємкості [11, с. 3–4], які мають циклоїдальний профіль стінок.

Галузеві технологічні процеси відділення металевих деталей від ливників. У роботах [12, с. 121; 13, с. 28–33] також уперше були

проведені аналітичні та експериментальні дослідження технологічного процесу відділення металевих деталей замка «блискавка» від ливників. Установлено [13, с. 30–34], що дана технологічна операція відбувається нерівномірно. На початку обробки спостерігається незначний приріст кількості відділених деталей від ливників. Значна інтенсифікація процесу реалізується, коли кількість відділених деталей від ливників в робочому масиві становить 20–80%. Після збільшення кількості відділених деталей у робочому масиві більше ніж 80% знову спостерігається зниження інтенсивності виконання технологічної операції.

Низька інтенсивність відділення деталей від ливників на початку технологічної операції пов'язана з тим, що вільний об'єм ємкості у цей час є найменшим, відливки вдаряться по стінках ємкості з меншою інтенсивністю. Низька інтенсивність відділення деталей від ливників у кінці технологічної операції відбувається за рахунок зміни співвідношення

між обробленими деталями (відділеними від ливників) та необробленими деталями, зокрема необроблених деталей по відношенню до всього робочого масиву стає дедалі менше. Відповідно, зі зменшенням кількості необроблених деталей, зменшується ймовірність їх зіткнення зі стінками ємкості за кожного оберту ведучого валу машини.

Досліджено [14, с. 150–220] вплив режимів руху робочого масиву на інтенсивність відділення металевих деталей замка «блискавка» від ливників. Експериментально встановлено, що найінтенсивніше відділення деталей від ливників відбувається під час реалізації водоспадного режиму руху робочого масиву. У цілому підтверджено, що для виконання технологічних операцій відділення металевих деталей замка «блискавка» від ливників, обладнання, в якому робоча ємкість виконує складний просторовий рух типу Turbula, є значно ефективнішим за обладнання з обертovими ємкостями, при цьому можна досягнути збільшення продуктивності у понад 10 разів.

Для ще більшої інтенсивності виконання технологічної операції відділення деталей від ливників слід використовувати робочі ємкості [15, с. 3–5], які виконані у формі шестигранних чи восьмигранних призм.

Висновки. Систематизовано літературні дані щодо перспективних галтувальних та змішувальних технологічних процесів у машинах зі складним просторовим рухом робочих ємкостей типу Turbula.

Доведено, що машини зі складним просторовим рухом робочих ємкостей типу Turbula можна успішно використовувати не лише для процесів змішування сипких дрібнодисперсних речовин, а й для інших галтувальних технологічних процесів.

Установлено, що з використанням машин зі складним просторовим рухом робочих ємкостей типу Turbula можна досягти значного збільшення продуктивності під час виконання галтувальних технологічних операцій обробки металевих та полімерних деталей.

Список літератури:

1. Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., Малишев В.В. Машини зі складним рухом робочих ємкостей для обробки полімерних деталей : монографія. Київ : Університет «Україна», 2018. 228 с.
2. Willy A. Bachofen (WAB): сайт Willy A. Bachofen AG, Maschinenfabrik. 2020. URL: <https://www.wab-group.com/en/> (дата відвідування: 31.01.2021).
3. Marigo M. Discrete Element Method Modelling of Complex Granular Motion in Mixing Vessels: Evaluation and Validation: dissertation EngD. The University of Birmingham, UK., 2012. P. 311.
4. Marigo M., Cairns D.L., Davies M., Cook M., Ingram A., Stitt E.H. Developing Mechanistic Understanding of Granular Behaviour in Complex Moving Geometry using the Discrete Element Method. Part A: Measurement and Reconstruction of TurbulaMixer Motion using Positron Emission Particle Tracking, *CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences*. 2010. Vol. 59. № 3. P. 217–238.
5. Marigo M., Cairns D.L., Davies M., Ingram A., Stitt E.H. Developing Mechanistic Understanding of Granular Behaviour in Complex Moving Geometry using the Discrete Element Method. Part B: Investigation of Flow and Mixing in the Turbula® mixer. *Powder Technology*. 2011. Vol 212. P. 17–24.
6. Mayer-Laigle C., Gatamel C., Berthiaux H. Mixing dynamics for easy flowing powders in a lab scale Turbula mixer. *Chemical Engineering Research and Design*. 2015. Vol. 95. March. P. 248–261.
7. Marigo M., Cairns D.L., Davies M., Ingram A., Stitt E.H. A numerical comparison of mixing efficiencies of solids in a cylindrical vessel subject to a range of motions. *Powder Technology, Powder Technology*. 2012. № 217. P. 540–547.
8. Zalyubovskiy M.G., Panasyuk I.V., Smirnov Y.I., Klapstov Y.V., Malyshev V.V. Experimental investigation of the handling process of polymeric units in a machine with a compacted space movement of working capacity. *Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design*. 2019. № 2. P. 24–32.
9. Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., Малишев В.В. Перспективні технології обробки деталей та змішування сипких речовин у рухомих робочих ємкостях (частина 1: способи технологічних операцій). *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2020. № 2. Т. 31(70). С. 29–35.
10. Zalyubovskiy M.G., Panasyuk I.V., Smirnov Y.I., Kuznetsova O.O., Malyshev V.V. Analytical determination of the time of handling process of polymeric details in a machine with a complex movement of working container. *Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design*. 2019. Vol. 3(134). P. 9–17.
11. Панасюк І.В., Залюбовський М.Г. Патент №92545, МПК В01F 11/00. Машина для обробки деталей / заявник та патентовласник – Київський національний університет технологій та дизайну № u201401842; заяв. 25.02.2014, опуб. 26.08.2014, бюл. № 16.
12. Копин В.А., Макаров В.Л., Ростовцев А.М. Обработка изделий из пластмасс. Москва : Химия, 1988. 176 с.

13. Залюбовський М.Г., Панасюк І.В. Експериментальне дослідження впливу режимів руху робочого масиву та об'єму заповнення ємкості на інтенсивність відділення металевих деталей від ливників. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2020. № 1(142). С. 27–38.

14. Бурмістенков О.П. Виробництво литих деталей та виробів із полімерних матеріалів у взуттєвій та шкіргалантерейній промисловості. Хмельницький : ХНУ, 2007. 255 с.

15. Панасюк І.В., Залюбовський М.Г. Патент № 108645, МПК В01F 11/00, В24В 31/00. Машина для обробки деталей / заявник та патентовласник – Київський національний університет технологій та дизайну ; № u201600830; заяв. 02.02.2016, опуб. 25.07.2016, бюл. № 14.

Zalyubovskiy M.G., Panasyuk I.V., Malyshev V.V. PROSPECTIVE THROWING AND MIXING TECHNOLOGICAL PROCESSES IN THE TURBULA TYPE MACHINE

When performing tumbling technological processes, as well as mixing processes of loose finely dispersed substances, equipment with containers is used, which have a different nature of movement. Today, in the overwhelming majority of cases, it is known to use vibration machines, machines with rotary motion of working containers, as well as machines of the rotary and spindle type. However, these types of equipment create a low intensity of movement of a free-flowing working medium in the middle of the tanks, which leads to a decrease in the productivity of performing the corresponding technological operations and, at the same time, to an increase in energy consumption. Machines with rotary motion of working containers are considered an outdated type of equipment; the duration of the tumbling technological operations can reach 48 hours of continuous operation of such a machine. It is proved that for technological operations of mixing loose finely dispersed substances, as well as for tumbling technological operations, it is more rational to use machines with a complex spatial movement of working containers such as "Turbula". It was determined that when loading two fractions of free-flowing fine-dispersed substances into a working vessel that performs complex spatial motion, a transverse loading model should be used. The time spent on tumbling technological operations for polishing the surface of polymer parts can be reduced by almost half, and the time spent on separating metal parts from the sprues - more than ten times. The relationship between the change in the modes of movement of a granular working medium inside the containers, which perform complex spatial movement and the intensity of the corresponding technological operations, has been determined. It is proved that to implement the separation of metal parts from the sprues and mixing processes of loose finely dispersed substances, it is necessary to provide a waterfall mode of movement of a granular working medium, to implement the processes of polishing the surface of polymer parts – a mixed mode of movement.

Key words: *mixing, casting technological processes, free-flowing fine substances.*