

$$\Delta S = S' - S = \int \rho \ln \rho dV - \int \rho' \ln \rho' dV'$$

вздовж кожної траєкторії в межах частки фазової рідини не зменшується,

$$\frac{d}{dt} \Delta S = - \int \rho \left( \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \mathbf{F} \right) dV + \int \rho' \left( \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}'} \mathbf{F}' \right) dV' \geq 0,$$

якщо вважати, що система є *ергодичною*, тобто, середнє значення дивергенції по ансамблю можна замінити середнім за часом. Можна скласти ці нерівності по всім траєкторіям, одержимо відповідну нерівність для частки фазової рідини.

Величину  $\Delta S$  можна вважати внутрішнім часом. Її зростання обумовлює відмінність майбутніх подій від минулих, що є невід'ємною властивістю суб'єктивного часу. Виходячи з попередніх міркувань, незалежно від напрямку відрахування фізичного часу, внутрішній час буде завжди спрямований від минулого до майбутнього. При наближенні до стану рівноваги внутрішній час уповільнюється, а фізичний час, відповідно, прискорюється по відношенню до внутрішнього. Внутрішній час  $\Delta S$  є також універсальним, як і фізичний, з тієї причини, що визначається для кожної системи за однією формулою.

### Література

1. Сучасна фізика як новітня натуральна філософія/ О.В. Біловол, Харків: ФОП Панов А,М., 2019. 116 с.

Богдан Дмитро Іванович, к.т.н., доц., ХНАДУ, phd.bogdan@gmail.com,  
Єгоров Павло Анатолійович, к.т.н., доц., ХНАДУ, phd.egpavel@gmail.com

## ГАЛТУВАННЯ ЯК НЕВІД'ЄМНА ЧАСТИНА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЦИКЛУ ВИРОБНИЦТВА ДЕТАЛЕЙ ЗА ДОПОМОГОЮ ЛАЗЕРНОЇ РІЗКИ

Останнім часом набули поширення вібраційні методи обробки. Їх застосування сприяє інтенсифікації різних процесів, підвищує якість обробки, рівень механізації та автоматизації багатьох трудомістких робіт, економічну ефективність і продуктивність праці.

Широкі технологічні можливості цього методу у поєднанні з високою продуктивністю на очисних, шліфувально-полірувальних і зміцнювальних операціях ставлять його до найбільш актуальних та перспективних способів обробки та зміцнення деталей машин та приладів. Висока інтенсивність і

економічність вібраційних процесів обумовлюються можливістю одночасної обробки великої кількості деталей по всій їх поверхні.

Особливої актуальності галтування набуло при обробці після штамповки деталей з листового матеріалу, яка часто застосовується при виробництві кузовів автомобіля.

Широкого поширення набула технологія лазерного розкроювання листового матеріалу. Це обумовлено насамперед низьким співвідношенням вартості робіт з обробки до вартості матеріалу, що сприятливо позначається на собівартості кінцевого виробу, оскільки частіше за все вартість механічної обробки перевищує вартість самого матеріалу. За рахунок високого ступеня автоматизації технологічного процесу різання в деяких випадках вартість робіт може наближатися до вартості матеріалів і навіть поступатися їй. Це пояснюється використанням автоматизованого проектування в сучасних САПР, що мають вбудований модуль роботи з листовим матеріалом, використанням САПР з оптимізації розкрою, що мінімізують витрати і довжину різки, розкромом на автоматизованих верстатах.

Як основний недолік одержуваних за допомогою лазерної різки деталей можна виділити оплавлення торцевої поверхні деталі, що особливим чином проявляється при обробці деталей з матеріалів з високою теплопровідністю (нержавіюча сталь, мідь, латунь і т. д.).

У разі ручної зачистки деталі повністю нівелюються всі переваги даного методу отримання деталей. Тому пропонується досконаліший метод обробки деталей після лазерного різання – галтування.

Сутність процесу вібраційної обробки полягає в послідовному нанесенні на поверхню оброблюваних деталей великої кількості мікроударів безліччю частинок робочого середовища при їх взаємному зіткненні і ковзанні, викликаних дією спрямованих вібрацій, що передаються робочій камері, в якій розміщені оброблювані деталі і робоче середовище. Його основою є механічне або механохімічне знімання дрібних частинок металу і його оксидів з оброблюваної поверхні, а також згладжування мікронерівностей шляхом їх пластичного деформування частинками робочого середовища, що здійснюють в процесі роботи коливальний рух [1, 3].

Процес вібраційної обробки протікає в такий спосіб. Оброблювані деталі завантажуються в робочу камеру, заповнену робочим середовищем з потрібними характеристиками. Робочій камері, що змонтована на пружинах і має можливість коливатися в різних напрямках, передається вібрація від вібратора з частотою  $f = 15 - 50$  Гц і амплітудою від 0,5 до 9 мм. У процесі вібрування деталі і робоче середовище безперервно піддаються змінним по знаку прискоренням. Робоче середовище і оброблювані деталі мають інтенсивне відносне переміщення, здійснюючи два види рухів: колювання і повільне обертання (циркуляційний рух) [2]. Від стінок робочої камери вібрація передається по прилеглим шарам робочого середовища, які передають її іншій частині матеріалу і т.д.

У процесі обробки деталі займають різні положення в робочому середовищі і проходять різні зони робочої камери, що забезпечує досить рівномірну обробку всіх поверхонь деталей, що контактують з частинками робочого середовища.

Вплив на оброблювану деталь одночасно великої кількості мікроударів у різних напрямках сприяє утриманню її у зваженому стані, виключаючи, таким чином, грубі вибоїни та пошкодження [2].

Процес обробки може протікати без додавання рідини або з періодичним чи безперервним промиванням вмісту робочої камери (деталей, робочого середовища) мастильно-охолоджуючої рідиною. Остання забезпечує видалення продуктів зносу (часток металу і абразиву) з поверхні деталей і частинок робочого середовища, змочує їх, сприяє розділенню і рівномірному розподілу деталей в робочому середовищі. Шляхом зміни рівня рідини в робочій камері регулюється інтенсивність обробки. До складу рідкого розчину можуть вводитися різні хімічні добавки зі спеціальними властивостями, що дозволяє регулювати інтенсивність процесу і якість обробки.

Залежно від призначення операції можуть застосовуватися металеві та неметалеві абразивні матеріали різних характеристик.

За формою робочої камери галтування бувають лоткові (рис. 1) та тороїдальні (рис. 2).

Лоткові галтовки мають переваги у вигляді можливості завантаження деталей великих габаритів, але разом з тим інтенсивність обробки деталей нижче в 1,5 рази, ніж у галтовок з тороподібною формою галтувальної камери.

Таким чином, зважаючи на широке поширення лазерного різання в металообробці сьогодні особливу актуальність набула необхідність усунення оплавлення і облою торця деталі. Запропонований авторами метод обробки, а саме галтування, має незаперечні переваги у зв'язку з високою автоматизацією і одночасною обробкою великої кількості деталей по всій її поверхні. Застосування галтування не знижує ефективність технологічного ланцюжка обробки деталей (проектування, лазерне різання, згинання, галтування, покриття, складання) і дозволяє уникнути ручних слюсарних операцій із усунення зазначених дефектів під час виготовлення деталей, що веде до зниження собівартості виробу і роблячи процес виготовлення деталей більш технологічним і доступним широкому колу споживачів.

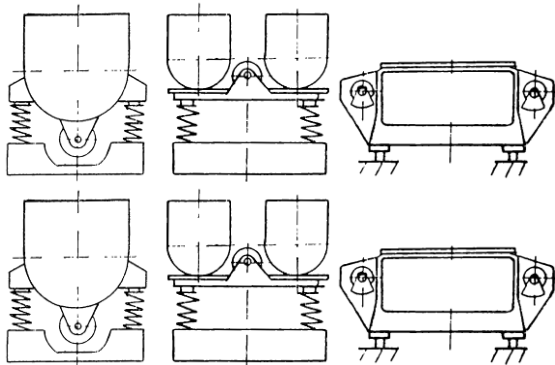


Рисунок 1. Компоновочні схеми лоткових галтовок

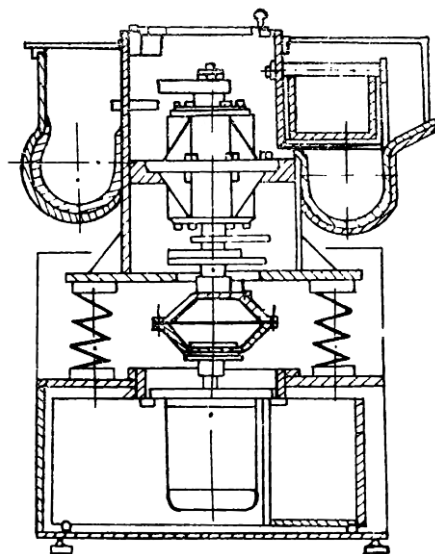


Рисунок 2. Схема галтувального станка с тороподібною робочою камерою

Застосування галтування в автомобілебудуванні також має особливу актуальність. Гострі кромки після штампування досить важко прибрати ручним способом через великі габарити деталі і невелику товщину листа. Вібраційна обробка дозволяє автоматизувати досить трудомісткий процес видалення окалини та масляного забруднення з листа перед нанесенням лакофарбового покриття. Крім того, регулярна створювана шорсткість на поверхні забезпечує хороше зчеплення з ґрунтом і, як наслідок, підвищує корозійну стійкість деталі.

Галтування деталей після термообробки має безперечну перевагу так як правильно підібраний розмір галтувальних тіл дозволяє одночасно обробити всю поверхню деталі досить складної форми. Необхідність ускладнення форм деталей найчастіше диктується необхідністю зниження матеріаломісткості при забезпеченні міцності. У свою чергу низька вага деталей забезпечує високу економічність при зниженні загальної маси автомобілів.

### Література

1. Малкин Д. Д. Теория и конструирование объемных виброобработывающих устройств. – В кн.: Вибрационная техника в машиностроении. Львов, 1967.
2. Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах (Под ред. Карташова И. Н. и др.). Киев, 1975.
3. Tennakoon S. G. K., Behringer R. P. Vertical and horizontal vibration of granular materials: Coulomb friction and a novel switching state. Phys. Rev. Lett., 1998, 81. № 4, pp. 794-798.

Воропай Олексій Валерійович, д.т.н., зав. каф. деталей машин і теорії механізмів і машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, [voropay.alexey@gmail.com](mailto:voropay.alexey@gmail.com), +380505249254

Гнатенко Григорій Олександрович, к.т.н., доцент каф. підйомно-транспортних машин і обладнання Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, [gnatenko.kpi@gmail.com](mailto:gnatenko.kpi@gmail.com)

### ОПТИМІЗАЦІЯ 3D МОДЕЛІ ВАЛ-ШЕСТЕРНІ ДЛЯ ЇЇ ВИГОТОВЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ АДДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

В даний час існує безліч адитивних технологій, що дозволяють у порівняно короткі терміни отримати прототип виробу, що виготовлюється, а в ряді випадків і робочу деталь. Серед різноманітності адитивних технологій (Fused deposition modeling, Stereolithography, Selective laser sintering, Laminated object manufacturing, Multi-jet modeling, PolyJet, 3DP, Liquid interface production, Direct metal deposition and others) [1-4], деякі доступні широкому колу користувачів через їхню простоту і дешевизну. Серед таких доступних технологій Fused deposition modeling (FDM) та Stereolithography (STL або SLA).