

Ковалевський С. В.
Ковалевська О. С.
Коваленко О. М.

ВПЛИВ ШИРОКОСМУГОВИХ МІКРОАМПЛІТУДНИХ ВІБРАЦІЙ НА ПРОЦЕС ШТАМПУВАННЯ

Штамування є широко використовуваним методом виготовлення деталей з металу, пластика та інших матеріалів. Цей метод дозволяє отримувати деталі з високою точністю розмірів і форми, а також з хорошими механічними властивостями. Однак, штампування часто супроводжується дефектами поверхні та недостатньою точністю виробу. Ці дефекти можуть призвести до зниження якості деталей і їх експлуатаційних характеристик. Одним із способів покращення якості поверхні деталей при штампуванні є використання вібрацій. Вібрації можуть впливати на різні фактори, які впливають на якість поверхні деталей, такі як сила тертя, розподіл матеріалу і деформації. У статті розглядається вплив широкосмугових мікроамплітудних вібрацій на якість поверхні деталей при штампуванні. Автори статті розробили три математичні моделі, які описують поведінку сили тертя, розподіл матеріалу і деформації в умовах вібрацій. Результати досліджень показали, що вібрації можуть покращити якість поверхні деталей при штампуванні, особливо для м'яких матеріалів. Вібрації можуть зменшити силу тертя між інструментом і заготовкою, що може призвести до зменшення задирок і інших дефектів поверхні. Вібрації також можуть покращити розподіл матеріалу в зоні штампування, що може допомогти підвищити точність виробу, підвищити якість поверхні та підвищити продуктивність технологічного процесу. Автори статті стверджують, що математичні моделі, розроблені в рамках їх дослідження, є корисними інструментами для прогнозування впливу вібрацій на якість поверхні деталей. Ці моделі можуть бути використані для оптимізації параметрів штампування з метою отримання найкращої якості поверхні деталей.

Ключові слова: штампування, вібрації, якість поверхні, математичне моделювання, широкосмугові мікроамплітудні вібрації, сила тертя, розподіл матеріалу, деформації.

У процесі штампування матеріалів однією з найважливіших задач є зменшення тертя між інструментом та деформованим матеріалом. Це важливо для досягнення точності формування деталей та попередження можливих пошкоджень. Одним з перспективних підходів для вирішення цієї задачі є використання резонансних мікроамплітудних вібрацій у технологічних процесах металообробки [1, 2, 3].

Застосування резонансних мікроамплітудних вібрацій спрямоване на створення оптимальних умов для процесу деформації матеріалу. На основі принципів резонансу, цей підхід забезпечує гармонійну взаємодію інструмента та деталі, знижуючи внутрішнє тертя та сприяючи більш плавній деформації. Це може суттєво поліпшити якість виготовлених виробів, зменшити ризик можливих пошкоджень деталей та зменшити потребу в подальшій обробці [4].

Використання мікроамплітудних вібрацій може сприяти зсуву матеріалу з меншими зусиллями, що відзначається зменшенням споживання енергії під час процесу. Крім цього, такий підхід дозволяє досягти більш точного контролю над деформацією, що має важливе значення для виробництва високоякісних деталей [5, 6, 7].

Широкасмугові мікрівібрації є одним з ключових елементів резонансних мікроамплітудних вібрацій у процесі штампування. Вони забезпечують можливість адаптації резонансних характеристик системи «заготівка-штамп» до конкретних умов деформації.

Резонансна частота системи «заготівка-штамп» може змінюватися в залежності від різних факторів, таких як:

- матеріал заготовки;
- форма заготовки;
- взаємна орієнтація заготовки та штампа;
- зусилля штампування;

– швидкість деформації.

Широкосмугові мікровібрації дозволяють охопити широкий діапазон частот і забезпечують можливість адаптації резонансних характеристик системи «заготівка-штамп» до конкретних умов деформації. Це дає можливість підвищити ефективність штампування та покращити якість виготовлених деталей.

У сучасних умовах розвитку виробництва та технологій, актуальність дослідження впливу широкосмугових мікроамплітудних вібрацій на процес штампування матеріалів виявляється в тому, що забезпечення високої якості виробів та оптимізація процесів є ключовими завданнями в машинобудуванні та металообробці. Зменшення тертя між інструментом та деформованим матеріалом, а також підвищення точності формування деталей мають велике значення для досягнення високої продуктивності та зниження витрат виробництва. Використання резонансних мікроамплітудних вібрацій разом із широкосмуговими коливаннями може відкрити нові можливості для оптимізації та покращення процесів штампування, що робить це дослідження актуальним та перспективним.

Метою статті є теоретичне дослідження впливу широкосмугових мікроамплітудних вібрацій на процес штампування матеріалів.

Робота зосереджена на висвітленні впливу:

- широкосмугових мікроамплітудних вібрації на резонансну частоту системи «заготівка-штамп»;
- тертя між інструментом і деформованим матеріалом;
- якості виготовлених деталей.

Для цього використані математичні моделі для опису процесів, що відбуваються в системі «заготівка-штамп» під час дії широкосмугових мікроамплітудних вібрацій. Широкосмугові вібрації є "білим шумом", тобто вони містять всі частоти в широкому діапазоні. Це означає, що вони можуть впливати на резонансну частоту системи «заготівка-штамп» в широкому діапазоні частот.

Система «заготівка-штамп» буде завжди викликати резонанс, оскільки вона є динамічною системою. Резонанс виникає, коли частота зовнішнього збурення збігається з власною частотою коливань системи. У випадку системи «заготівка-штамп» власна частота коливань визначається такими факторами, як матеріал заготовки, форма заготовки, взаємна орієнтація заготовки та штампа, зусилля штампування та швидкість деформації.

У процесі деформування заготовки власна частота коливань системи може змінюватися. Це відбувається через те, що змінюється форма заготовки та розподіл напружень у ній. Зміна власної частоти коливань системи може призвести до резонансу, навіть якщо система не перебувала в резонансі на початку деформації.

Таким чином, ефект резонансу буде завжди присутній у системі «заготівка-штамп», навіть якщо використовуються широкосмугові вібрації. Однак, широкосмугові вібрації можуть допомогти запобігти резонансу, підвищивши резонансну частоту системи. Це може бути корисно для підвищення якості виготовлених деталей. Широкосмугові вібрації можуть також призвести до інших ефектів, таких як зменшення тертя між заготовкою і штампом та підвищення ефективності штампування. Для ефективного використання широкосмугових вібрацій необхідно враховувати всі фактори, які можуть впливати на резонансну частоту системи. Для цього розроблені три математичні моделі такого процесу.

1.Формалізований опис впливу широкосмугових мікроамплітудних вібрації на резонансну частоту системи «заготівка-штамп» має наступні складові.

Нехай система «заготівка-штамп» має резонансну частоту f_0 (рад/с) без вібрацій. При дії широкосмугових мікроамплітудних вібрації з частотою f_v (рад/с) коефіцієнт пружності системи k_v (Н/м) можна розрахувати за наступною формулою:

$$k_v = k_0 \cdot \left(1 + \frac{f_v^2}{f_c^2}\right), \quad (1)$$

де:

k_0 – коефіцієнт пружності системи без вібрацій (Н/м);

f_c – критична частота вібрації (рад/с).

Критична частота вібрації – це частота, при якій система стає нестійкою. Для системи «заготівка-штамп» критична частота вібрації може бути розрахована за наступною формулою:

$$f_c = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{k_0}{m}})}, \quad (2)$$

де:

m – маса системи (кг).

Резонансна частота системи з вібраціями f_r (рад/с) можна розрахувати за наступною формулою:

$$f_r = f_0 \cdot \sqrt{\left(1 + \left(\frac{k_v}{k_0}\right) \cdot f_v^2\right)}. \quad (3)$$

Ці формули показують, що вплив широкосмугових мікроамплітудних вібрації на резонансну частоту системи «заготівка-штамп» залежить від двох факторів:

– частота вібрації (чим вища частота вібрації, тим більший вплив вона має на резонансну частоту);

– критична частота вібрації (якщо частота вібрації перевищує критичну частоту, то система стає нестійкою і резонансна частота стає нескінченною).

Збільшення частоти вібрації або зменшення критичної частоти вібрації системи призведе до підвищення резонансної частоти системи з вібраціями. Це означає, що система буде вібрувати з більш високою частотою і резонанс буде менш ймовірним.

2. Ряд дослідників вказують на те, що дія вібрації призводить до зміни умов тертя і зносостійкості контактуючих поверхонь деталей машин, що може підвищувати ефективність процесів [8,9,10].

В цьому напрямку перспективними стають дослідження можливостей додаткового, крім традиційних антифрикційних заходів, впливу мікро вібрацій на зменшення сил тертя безпосередньо при формоутворенні заготовок, а також при експлуатації технологічних машин.

Розглянуто формулу (4) вплив мікрівібрацій з амплітудою Q і частотою ω з фазовим кутом φ на силу F тертя при коефіцієнті тертя k , що діють на масу M тіла:

$$M \cdot \ddot{x} + F \cdot \frac{\dot{x}}{|\dot{x}|} + k \cdot x = Q \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi). \quad (4)$$

Відносно F формула (1) набуває вигляду (2):

$$F = \frac{|\dot{x}|}{\dot{x}} \cdot [Q \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) - M \cdot \ddot{x} - k \cdot x]. \quad (5)$$

В формулі (5) співмножник $\frac{|\dot{x}|}{\dot{x}}$ відображає особливості поведінки сухого тертя при мікроамплітудних коливаннях (вібраціях).

Рішення в точному аналітичному вигляді немає, тому для дослідження поведінки системи відносно сили тертя було використано моделювання в середовищі Simulink пакету Matlab 8. В загальному вигляді побудовано модель, рис. 1.

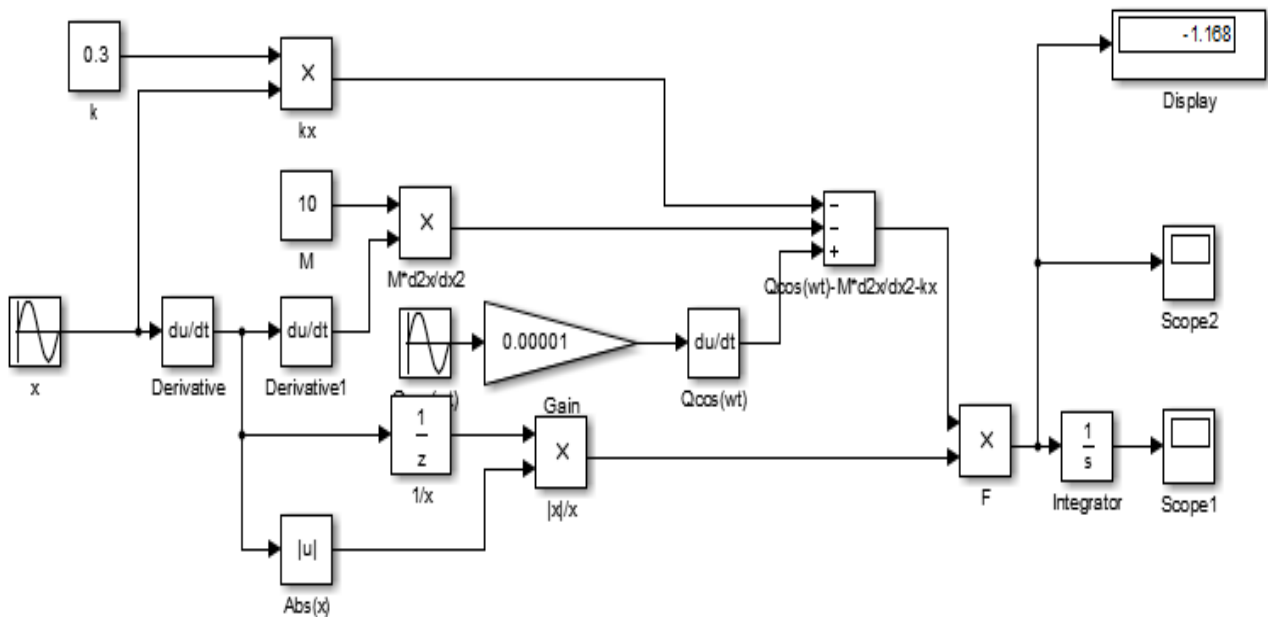


Рис. 1. Модель Simulink для дослідження сили сухого тертя F з мікрівбраціями

Для умов, де $M = 10$ кг, $k = 0,3$, $Q = 0,00001$ м, отримано, що сила F має періодично змінні значення, які набувають мінімумів при частотах $\omega_1 = 2000$ рад/с, $\omega_2 = 4000$ рад/с і $\omega_3 = 9000$ рад/с (рис. 2).

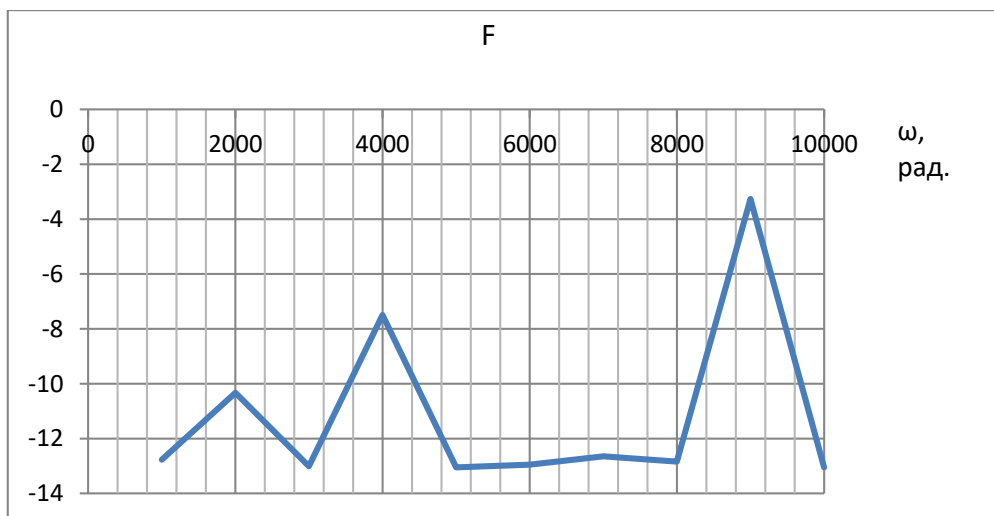


Рис. 2. Результати моделювання змін сили тертя при мікрівбраціях в умовах сухого тертя

Для випадку, коли використана модель з урахуванням в'язкого тертя (блок Coulomb & Viscous Friction), побудована модель (рис. 3), а результати моделювання за такими ж умовами, надані на рис. 4.

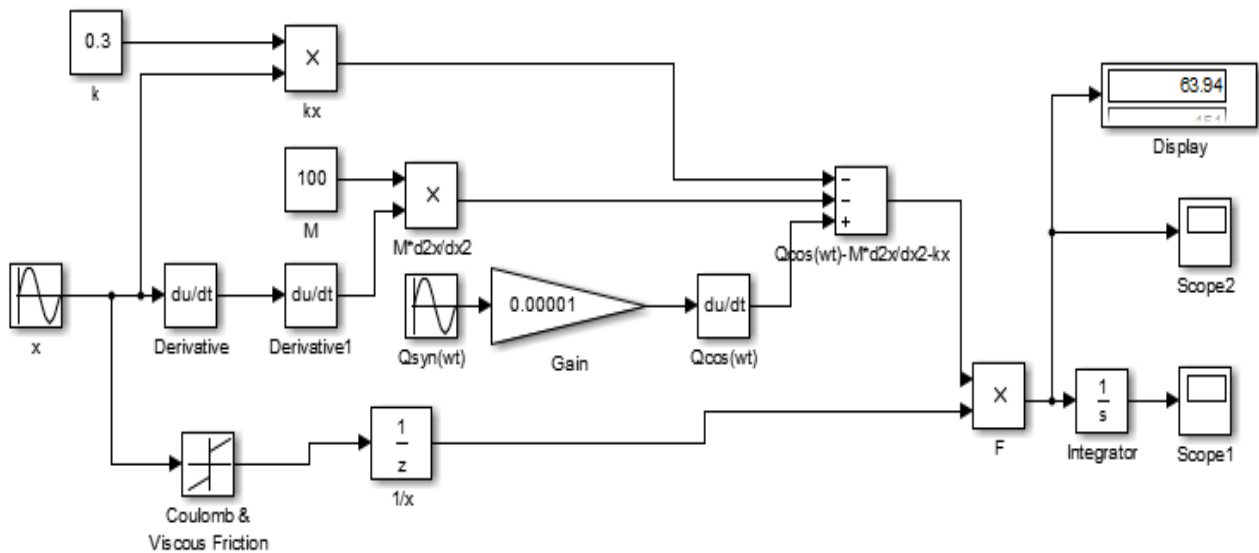


Рис. 3. Модель Simulink для дослідження сили в'язкого тертя F з мікрівібраціями.

Отриманні результати можуть бути використані при створенні математичної моделі тертя між інструментом і деформованим матеріалом з урахуванням всіх зауважень з приводу попередніх моделей:

$$F_t = F_{t0} \cdot \left(1 - \frac{f_v}{f_c}\right)^a \cdot \exp(-b \cdot A_V) \cdot K1_f \cdot K2_m \cdot K3_p, \quad (6)$$

де:

- F_t – сила тертя на одиницю площі (Н/м²)
- F_{t0} – початкова сила тертя (Н/м²)
- a – коефіцієнт, що характеризує залежність сили тертя від амплітуди вібрації
- b – коефіцієнт, що характеризує залежність сили тертя від швидкості деформації
- A_V – амплітуда вібрації (м)
- $K1_f$ – фактор форми заготовки
- $K2_m$ – фактор матеріалу заготовки
- $K3_p$ – фактор зусилля штампування

Ця модель враховує наступні фактори:

- Фактор форми заготовки $K1_f$ враховує те, що заготовка з більш складною формою має більшу площу поверхні, на якій можуть утворитися тріщини і задирки.
- Фактор матеріалу заготовки $K2_m$ враховує те, що м'які матеріали мають меншу міцність і більш схильні до утворення тріщин і задирок.
- Фактор зусилля штампування $K3_p$ враховує те, що при низьких зусиллях штампування заготовка має більшу рухливість і схильна до деформацій.
- Коефіцієнт a характеризує залежність сили тертя від амплітуди вібрації. При $a < 1$ сила тертя зменшується зі збільшенням амплітуди вібрації, при $a > 1$ сила тертя збільшується зі збільшенням амплітуди вібрації.
- Коефіцієнт b характеризує залежність сили тертя від швидкості деформації. При $b > 0$ сила тертя збільшується зі збільшенням швидкості деформації, при $b < 0$ сила тертя зменшується зі збільшенням швидкості деформації.

Ця модель є більш точною і корисною, ніж попередні моделі. Вона дозволяє прогнозувати вплив вібрацій на якість поверхні заготовки в більш широкому діапазоні умов.

Ось деякі приклади того, як можна використовувати цю модель:

- Для оптимізації процесу штампування з використанням вібрацій можна використовувати цю модель для визначення оптимальних значень частоти вібрації, амплітуди вібрації та інших параметрів.

- Для оцінки впливу вібрацій на якість поверхні заготовок можна використовувати цю модель для розрахунку якості поверхні заданих параметрів вібрації.

Для дослідження цієї моделі в подальшому будуть проведенні експерименти зі штампуванням заготовок з різних матеріалів, при різних частотах вібрації, амплітудах вібрації та інших параметрах.

На основі результатів експериментів можна оцінити точність і корисність цієї моделі.

3. Математична модель впливу широкосмугових мікроамплітудних вібрації на якість поверхні заготовки може бути побудована наступним чином.

$$Q = Q_0 \cdot \left(1 - \frac{f_v}{f_c}\right)^a \cdot K_{4f} \cdot K_{5m} \cdot K_{6p}, \quad (7)$$

де:

- Q – якість поверхні заготовки (бали)
- Q_0 – початкова якість поверхні заготовки (бали)
- K_{4f} – фактор форми заготовки
- K_{5m} – фактор матеріалу заготовки
- K_{6p} – фактор зусилля штампування

Ця модель враховує наступні фактори:

- Фактор форми заготовки K_{4f} враховує те, що заготовка з більш складною формою має більшу площу поверхні, на якій можуть утворитися тріщини і задирки.

- Фактор матеріалу заготовки K_{5m} враховує те, що м'які матеріали мають меншу міцність і більш схильні до утворення тріщин і задирок.

- Фактор зусилля штампування K_{6p} враховує те, що при низьких зусиллях штампування заготовка має більшу рухливість і схильна до деформацій.

Деякі приклади того, як можна використовувати цю модель:

- Для оптимізації процесу штампування з використанням вібрацій можна використовувати цю модель для визначення оптимальних значень частоти вібрації, амплітуди вібрації та інших параметрів.

- Для оцінки впливу вібрацій на якість поверхні заготовок можна використовувати цю модель для розрахунку якості поверхні заданих параметрів вібрації.

Обговорюючи статтю, необхідно підкреслити, що модель добре описує поведінку сили тертя між інструментом і заготовкою при різних умовах. Модель дозволяє прогнозувати вплив вібрацій на якість поверхні заготовок в широкому діапазоні умов.

Однак, модель має деякі обмеження. По-перше, модель не враховує вплив інших факторів, таких як температура, вологість, чистота поверхні та ін. По-друге, модель не є повністю кількісною, оскільки деякі параметри, такі як коефіцієнти a і b , мають емпіричний характер.

Незважаючи на ці обмеження, модель є цінним інструментом для оптимізації процесу штампування з використанням вібрацій. Модель дозволяє дослідникам і інженерам краще розуміти вплив вібрацій на якість поверхні заготовок і розробляти більш ефективні методи штампування.

Ось деякі напрямки для подальших досліджень:

- Врахування впливу інших факторів, таких як температура, вологість, шорсткість поверхні та ін.

- Розробка більш кількісної моделі, яка буде використовувати більш точні значення коефіцієнтів a і b .

- Розробка методів для точного визначення коефіцієнтів a і b для конкретного матеріалу і процесу штампування.

Ці дослідження можуть допомогти зробити модель ще більш змістовною для інженерів і дослідників.

ВИСНОВКИ

В результаті слід відмітити, що математичне моделювання дозволяє дослідникам і інженерам краще розуміти, як вібрації впливають на різні фактори, що впливають на якість поверхні деталей при штампуванні, такі як сила тертя, розподіл матеріалу і деформації. Результати моделювання можуть бути використані для оптимізації параметрів штампування, таких як частота і амплітуда вібрацій, з метою отримання найкращої якості поверхні деталей. Використання широкопasmових віброзбуджувачів дозволяє впливати на широкий спектр частот і амплітуд вібрацій, що може забезпечити більш ефективний контроль над процесом штампування. Комбіноване штампування з іншими варіантами додаткового впливу на шар між заготівкою і штампом може призвести до ще більшого покращення якості поверхні деталей, отриманих холодним штампуванням.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Mitsyk Andrii, Vladimir Fedorovich, and Anatoliy Grabchenko. "Interaction of the abrasive medium with the treated surface and the process of metal removal during vibration treatment in the presence of a chemically active solution." *Cutting & Tools in Technological System* 94 (2021): 1-12.
2. Fedorovich, Vladimir, Dmitri Fedorenko, Ivan Pyzhov, and Yevgeniy Ostroverkh. "Modeling the influence of metal phase in diamond grains on self-sharpening of grinding wheels on ceramic bonds." *Cutting & Tools in Technological System* 94 (2021): 13-24.
3. Kovalevskyy, Sergiy, Olena Kovalevska. "Identification and technological impact of broadband vibration on the object." *Advanced Manufacturing Processes III*. Springer Nature, Cham, 2022. 1-13.
4. Mohamad, G., Drtroubia, N., and Faisala, N. "Acoustic emission method for defect detection and identification in carbon steel welded." *Journal of Constructional Steel Research* 13 (7) (2017): 28-37.
5. Pavlenko, I., Trojanowska, J., Ivanov, V., and Liaposhchenko, O. "Parameter identification of hydro-mechanical processes using artificial intelligence systems." *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics* 2019 (5) (2019): 1-12.
6. Pavlenko, I., Ivanov, V., Gusak, O., Liaposhchenko, O., and Sklabinskyi, V. "Parameter identification of technological equipment for ensuring the reliability of the vibration separation process." In *4th EAI International Conference on Management of Manufacturing Systems*, edited by L. Knapcikova, M. Balog, D. Perakovic, and M. Perisa, 261-272. Springer Nature, Cham, 2020.
7. Kishawy, H.A., Hegab, H., Umer, U., and Mohany, A. "Application of acoustic emissions in machining processes: analysis and critical review." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 98 (5-8) (2018): 1391-1407.
8. Шпачук В. П. Синергетичний ефект у динаміці багатовимірних механічних систем : монографія. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 172 с.
9. Михалевич М. Г. Зчеплення транспортних засобів. Математичне моделювання та автоматизація: монографія. Харків: ХНАДУ, 2020. 174 с.
10. Цибрій Ю. О. Розробка мехатронної системи керування електроннопроменевою плавкою титану. *13-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові*. Матеріали симпозіум. Львів, 2017. С. 209–210.

REFERENCES

1. Mitsyk, Andrii, Vladimir Fedorovich, and Anatoliy Grabchenko. "Interaction of the abrasive medium with the treated surface and the process of metal removal during vibration treatment in the presence of a chemically active solution." *Cutting & Tools in Technological System* 94 (2021): 1-12.
2. Fedorovich, Vladimir, Dmitri Fedorenko, Ivan Pyzhov, and Yevgeniy Ostroverkh. "Modeling the influence of metal phase in diamond grains on self-sharpening of grinding wheels on ceramic bonds." *Cutting & Tools in Technological System* 94 (2021): 13-24.
3. Kovalevskyy, Sergiy, and Olena Kovalevska. "Identification and technological impact of broadband vibration on the object." *Advanced Manufacturing Processes III*. Springer Nature, Cham, 2022. 1-13.
4. Mohamad, G., Drtroubia, N., and Faisala, N. "Acoustic emission method for defect detection and identification in carbon steel welded." *Journal of Constructional Steel Research* 13 (7) (2017): 28-37.
5. Pavlenko, I., Trojanowska, J., Ivanov, V., and Liaposhchenko, O. "Parameter identification of hydro-mechanical processes using artificial intelligence systems." *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics* 2019 (5) (2019): 1-12.

6. Pavlenko, I., Ivanov, V., Gusak, O., Liaposhchenko, O., and Sklabinskyi, V. "Parameter identification of technological equipment for ensuring the reliability of the vibration separation process." In 4th EAI International Conference on Management of Manufacturing Systems, edited by L. Knapcikova, M. Balog, D. Perakovic, and M. Perisa, 261-272. Springer Nature, Cham, 2020.

7. Kishawy, H.A., Hegab, H., Umer, U., and Mohany, A. "Application of acoustic emissions in machining processes: analysis and critical review." International Journal of Advanced Manufacturing Technology 98 (5-8) (2018): 1391-1407.

8. Shpachuk V. P. Synergetic effect in the dynamics of multidimensional mechanical systems: monograph. national city university farm named after O. M. Beketova. Kharkiv: XNUMX named after O. M. Beketov, 2018. 172 p.

9. Mykhalevych M. G. Clutch of vehicles. Mathematical modeling and automation: monograph. – Kharkiv: KHNADU, 2020.-174 p.

10. Tsybrii Yu.O. Development of a mechatronic control system for electron beam melting of titanium. International Symposium of Ukrainian Mechanical Engineers in Lviv. Symposium materials. Lviv, 2017. P. 209–210.

Kovalevskyy S., Kovalevska O., Kovalenko O. Influence of broadband micro-amplitude vibrations on the stamping process.

Stamping is a widely used method for manufacturing parts from metal, plastic, and other materials. This method allows obtaining parts with high precision of dimensions and shape, as well as with good mechanical properties. However, stamping is often accompanied by surface defects and insufficient product accuracy. These defects can lead to a decrease in the quality of parts and their operational characteristics. One of the ways to improve the surface quality of parts in stamping is the use of vibrations. Vibrations can affect various factors that influence the surface quality of parts, such as friction force, material distribution, and deformation. The article examines the influence of broadband micro-amplitude vibrations on the surface quality of parts in stamping. The authors of the article developed three mathematical models that describe the behavior of friction force, material distribution, and deformation under vibration conditions. The research results showed that vibrations can improve the surface quality of parts in stamping, especially for soft materials. Vibrations can reduce the friction force between the tool and the workpiece, which can lead to a reduction in burrs and other surface defects. Vibrations can also improve the material distribution in the stamping zone, which can help increase product accuracy, enhance surface quality, and improve the productivity of the technological process. The authors of the article assert that the mathematical models developed within their research are useful tools for predicting the impact of vibrations on the surface quality of parts. These models can be used to optimize stamping parameters to achieve the best surface quality of parts.

Keywords: stamping, vibrations, surface quality, mathematical modeling, broadband micro-amplitude vibrations, friction force, material distribution, deformation.

Ковалевський Сергій Вадимович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрою ДДМА

Kovalevskyy Sergiy – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department DSEA

E-mail: kovalevskii61@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4708-4091>

Ковалевська Олена Сергіївна – канд. техн. наук, доц., доцент каф. обробки металів тиском ДДМА

Kovalevska Olena – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor DSEA

E-mail: olenakovalevska@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5884-0430>

Коваленко Олена Михайлівна – аспірантка ДДМА

Kovalenko Olena – Postgraduate student DSEA

E-mail: balenkovalena@gmail.com

Донбаська державна машинобудівна академія (ДДМА), м. Краматорськ
Donbas State Engineering Academy (DSEA), Kramatorsk