УДК 621.762.4 DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)117

Драгобецький В. В.
Савєлов Д. В.
Молоштан Д. В.

РЕЗОНАНСНІ ЯВИЩА В ПРОЦЕСАХ ВІБРАЦІЙНОГО УЩІЛЬНЕННЯ ПОРОШКОВИХ ЗАГОТОВОК

У роботі розглянуто процес деформування дисперсної порошкової суміші вібраційним робочим органом, який здійснює періодичні коливання у вертикальній площині. Метою роботи є пошук шляхів зменшення величини роботи пластичної деформації у процесах ущільнення дисперсних порошкових середовищ під час виробництва порошкових заготовок. Під час поетапного деформування порошкової заготовки з певною кутовою частотою вимушених коливань відбувається релаксація напруженого стану та утворення поблизу концентраторів напружень резонансних явищ. Внаслідок розвитку процесів множинного ковзання формується хвиля пластичної деформації та розвивається вібропластичний ефект. Встановлено, що знаючи частоту періодичних елементарних зрушень пластичного перебігу і діючи на об'єм, що деформується зовнішнім навантаженням з тією ж або близькою частотою, можна узгодити хід пластичної плинності з характером застосування цього навантаження і, на основі складання двох періодичних процесів, створити вібропластичний резонанс. У зоні дефектів кристалічної решітки відбувається поглинання енергії коливань. Це призводить до підвищення потенційної енергії дислокацій, зменшення переміщення зсуваючого напруження та самоорганізації дисипативної системи. Отримані теоретичні залежності для визначення опору зсуву, енергії та ширини дислокації під час руху її з певною швидкістю, власної частоти зсувної деформації, згинального осесиметричного моменту імпульсу та моменту кількості руху. Виявлено, що у разі використання резонансних явищ у процесах формозміни порошкових заготовок виявлено значне скорочення деформувальних зусиль і, як наслідок, зниження роботи пластичної деформації.

Ключові слова: *порошкова суміш, пластична деформація, вібропластичний ефект, коливання, резонансні явища.*

Для виробництва порошкових заготовок використовуються різні методи, в яких, як правило, робочий орган ущільнюючої машини деформує металевий порошок, який знаходиться в товстостінній формі та уявляється у вигляді дисперсного порошкового середовища анізотропної структури. Одним із напрямків досліджень у галузі пластичного деформування є пошук можливості зниження величини роботи пластичного деформування та, як наслідок, зменшення енергетичних витрат.

Одним з методів інтенсифікації процесу деформування є хвильова дія на оброблюваний матеріал [1−8]. Багатьма дослідженнями з ущільнення дисперсних порошкових середовищ встановлено, що у разі застосування направлених поздовжніх коливань величина робочого зусилля зменшується тільки в тому випадку, коли швидкість коливальних рухів значно перевищує швидкість поздовжньої подачі, а застосування низькочастотних коливань ефективне лише у разі малих швидкостей деформування [1, 2].

Метою роботи є пошук шляхів зменшення величини роботи пластичної деформації у процесах ущільнення дисперсних порошкових середовищ під час виробництва порошкових заготовок.

Розглянемо процес виробництва порошкової заготовки вібраційним робочим органом, який здійснює спрямовані коливання у вертикальній площині (рис. 1).

У робочому режимі на пуансон 1 вібраційного робочого органу, який підвішений на пружних амортизаторах 2 до натискної плити 3, діє збудження у вигляді вертикально спрямованої гармонійної сили $P_в \sin \omega t$. В результаті цього пуансон 1 здійснює коливання у вертикальній площині та піддає вібраційному впливу дисперсну порошкову заготовку 4, що знаходиться у формі 5.

Рух цієї системи можна розглядати так: 1) удар пуансону об поверхню порошкової заготовки та її пластичне деформування; 2) відрив пуансону від деформованої поверхні порошкової заготовки та його рух у просторі до наступного удару.

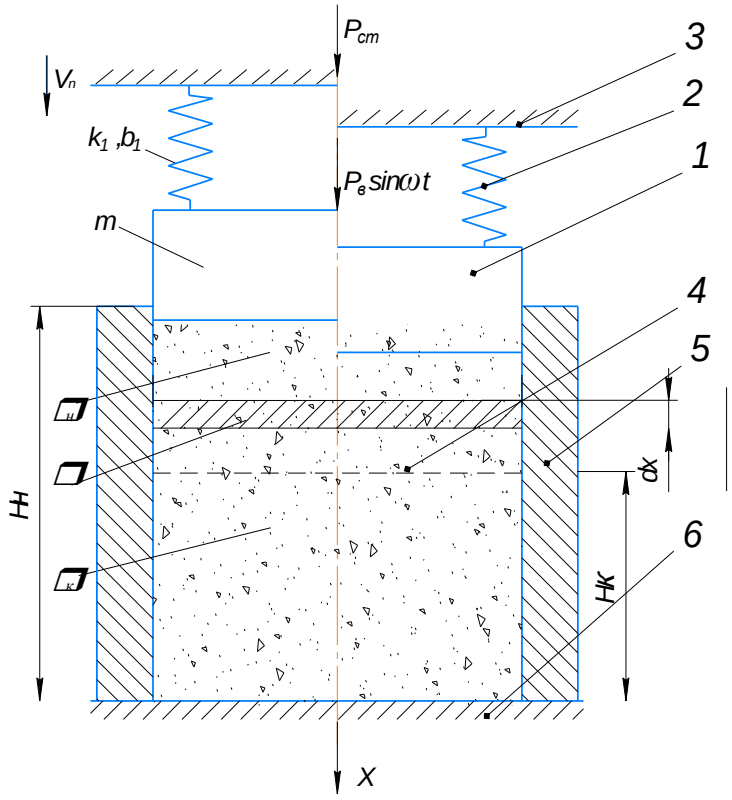

Рис. 1. Схема процесу деформування порошкової заготовки (1 − пуансон; 2 − пружний амортизатор; 3 − натискна плита; 4 − порошкова заготовка; 5 − форма; 6 − основа

Розглянемо перший етап руху пуансону. Розглянемо пластичне деформування порошкової маси як послідовність малих періодичних елементарних зрушень. Воно розвивається стрибкоподібно та обумовлено його хвильовою природою. Відповідно до останніх уявлень, пластична деформація є сукупністю послідовно протікаючих актів релаксації напруженого стану, створеного в матеріалі порошкової заготовки. Під час цих актів релаксації напруженого стану у сфері поблизу концентраторів напружень зароджуються резонансні явища.

Одним з визначальних актів пластичного формування є усунення дислокації вздовж площини ковзання. Для переходу дислокації з одного рівноважного стану до іншого їй необхідно подолати опір зсуву, який визначається так:

$$\tau_0 = \left(\frac{2 \cdot G}{K}\right) \cdot e^{-\frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda}{K \cdot b}}, \qquad (1)$$

де $K \approx 1$ − константа; λ − ширина дислокацій; b − відстань між атомами у напрямку, перпендикулярному площині зсуву.

Енергія дислокації під час руху її зі швидкістю v можна оцінити за формулою:

$$E_v = \frac{E_0}{1 - \frac{v^2}{a_{c\partial}^2}}, \qquad (2)$$

де E_0 − енергія дислокації в стані спокою; $a_{c\partial}$ − швидкість хвилі під час деформації зсуву.

Зі збільшенням v енергія дислокації збільшується і у разі $v \to a_{c\partial}$, $E_v \to \infty$.

Ширина дислокації λ залежить від швидкості руху:

$$\lambda = \lambda_0 \sqrt{\frac{1-\nu^2}{a^2_{cд}}}, \tag{3}$$

де λ_0 – ширина дислокації в стані спокою.

На кінцевій стадії мікропластичності анізотропної порошкової суміші поведінка зсувів стає взаємно корельованою так, що один зсув ініціює наступний. Внаслідок розвитку множинного ковзання формується хвиля пластичної деформації. Вона є тимчасово-просторовою структурою, яка відображає процеси самоорганізації дисипативних систем.

З точки зору хвильової теорії пластичної плинності знаходить пояснення факт зменшення величини формозмінювального зусилля при високочастотному деформуванні. У зоні дефектів кристалічної решітки відбувається поглинання енергії коливань. Це призводить до підвищення потенційної енергії дислокацій та зменшення переміщення зсуваючого напруження [2].

Теоретично та експериментально обґрунтовано явище резонансного вібропластичного ефекту [1], що полягає у зниженні величини опору пластичної деформації в'язко-пружних та в'язкопластичних середовищ, і виникає в результаті природного узгодження періодичності елементарних зрушень пластичного перебігу цих середовищ з синхронізацією хвильового впливу.

Знання оптимальної частоти прикладеної деформуючої вібраційної (хвильової) дії дозволяє суттєво знизити його величину [9], а також вирішувати деякі технологічні завдання обробки металів та сплавів. Встановлено [9], що в результаті резонансного вібропластичного ефекту має місце зменшення залишкових напружень, які зберігаються у тілі виробів. Це дозволяє використовувати ефект у процесах калібрування, згинання, витягування, формування та інших операцій.

Таким чином, пластична плинність має періодичний характер і є послідовністю елементарних зрушень всередині одиночних кристалів або між окремими кристалічними зернами.

Власна частота зсувної деформації [1] визначається за залежністю:

$$\nu = G \cdot \mu^{-1}, \tag{4}$$

де G – модуль зсуву, *Па*; μ^{-1}, μ^{-1} – коефіцієнт внутрішнього тертя, кг/(м·с).

Оскільки пластична плинність викликається і підтримується зовнішнім навантаженням, вона відноситься до розряду автоколивальних процесів, а матеріал, який деформується – до категорії автоколивальних систем. У випадку близькості власних частот взаємодіючих систем відбувається підстроювання енергетично менш потужної коливальної системи під параметри коливань більш енергетично потужної системи.

Встановлено [9], що знаючи частоту періодичних елементарних зрушень пластичного перебігу ν і діючи на об'єм, що деформується зовнішнім навантаженням з тією ж або близькою частотою, можна узгодити хід пластичної плинності з характером застосування цього навантаження і, на основі складання двох періодичних процесів, створити вібропластичний резонанс.

Аналогічний ефект був досягнений в процесах гідровибухового штампування [2, 9]. Попередньо повідомивши заготовці кінетичну енергію, яка потім переходить в енергію вигину, наприклад, при зіткненні з рідинним передавальним середовищем або у разі створення імпульсного розрядження в порожнині матриці, стимулюємо початкову пластичну плинність. Початок вигину здійснюється з певною кутовою швидкістю ω, а деформація поширюється від периферії до центру порошкової заготовки.

Додатковий заряд вибухової речовини забезпечує отримання навантаження, рівномірно розподіленого по заготовці протягом малого проміжку часу $\Delta\tau$. У результаті заготовка не встигає внаслідок своєї інерційності почати деформуватися під дією імпульсу $q\Delta\tau$ (рух деформування має початися з нескінченно великим прискоренням внаслідок малості Δτ), оскільки виходить розрив в прискореннях (так званий «м'який удар»).

Імпульс $q\Delta\tau$ накладає на порошкову заготовку згинальний осесиметричний момент імпульсу, значення якого визначається за залежністю:

$$M(\nu)\Delta\tau = -\frac{2}{3}\pi \cdot q \cdot \left(\frac{R^3}{2} - r^3\right) \cdot \Delta\tau\,, \tag{5}$$

де q − навантаження; $\Delta\tau$ − проміжок часу; R − радіус заготовки; r − радіус поточного шару заготовки.

Момент імпульсу урівноважується зміною моменту кількості руху:

$$I\omega_B = \frac{4 \cdot \pi \cdot \delta \cdot H \cdot R^2}{q} \cdot \left(\frac{R^2}{2} - \frac{4}{3} r \cdot R + r^2\right) \cdot \omega_B\,, \tag{6}$$

де ω_B − кутова частота вимушених коливань; H − товщина заготовки; γ − питома вага заготовки.

В результаті на заготовку, що отримується, накладається вимушена частота коливань вигину.

Збіг за модулем у перерізі r* будь-якого шару швидкостей ω і ωс спричинить виникнення в останньому режимі автоколивань. У перерізі r* утворюється пружно-пластичній рухомий шарнір певної амплітуди, який забезпечує впорядковане деформування.

Деякі розглядають залишкові напруження в тілі виробу після деформування як певну кількість енергії в конкретному обсязі.

Ця енергія витрачається на роботу процесів, пов'язаних з короблением. У разі узгодження зовнішнього впливу з деформаційною поведінкою матеріалу останній виявляється у стані енергетично більш стабільному, ніж у разі навантаження, характер докладання якої довільний або не відповідає деформаційним процесам всередині матеріалу. Стабільність енергетичного (напруженого) стану у матеріалі визначає мінімальний ступінь післяопераційного короблення.

ВИСНОВКИ

У разі деформування з частотою, що лежить у межах смуги синхронізації по відношенню до частоти періодичних елементарних зрушень пластичної плинності, ступінь післяопераційного короблення виявилася мінімальною, на один-два порядки меншою, ніж у попередніх випадках. Також виявлено, що у разі використання резонансних явищ у процесах формозміни порошкових заготовок виявлено значне скорочення деформувальних зусиль і, як наслідок, зниження роботи пластичної деформації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кузнецов В. Е. О возможности динамического воздействия на пластическое деформирование металлов. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1993. 5. С. 23−26.

2. Драгобецкий В. В., Марцинюк О. Б., Троцко О. В. Резонансные явления в процессах изменения литовых заготовок. *Вісник КДПУ.* Кременчук: КДПУ, 2006. Вип. 6/2006 (41). Ч. 2. С. 25–26.

3. Савелов Д. В. Моделирование процесса прессования порошковой заготовки в жесткой пресс-форме вибрационно-статическим способом. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.* Кременчук: КрНУ, 2015. 1/2015 (90), Ч. 1. С. 109–113.

4. Savelov D., Puzyr R., Dragobetsky V., Markevych A. Peculiarities of vibrational press dynamics with hard-elastic restraints in the working regime of metal powders molding. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. № 2, pp. 67–74.

5. Савелов Д. В. Моделирование процессов деформирования дисперсных и пористых порошковых заготовок. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.* Кременчук: КрНУ. 2015. 3/2015 (92). Ч. 1. С. 74–78.

6. Савелов Д. В., Маркевич А. Г. Баглюк Г. А. Усовершенствование технологии и оборудования для интенсификации процесса вибрационно-статического прессования металлических порошков. *Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы.* Сварка: сб. докладов 9-го межд. симпозиума 8-10 апреля 2015. Минск: Беларуская навука. С. 196–206.

7. Maslov O., Savielov D., Salenko Y., Javadova M. (2022) Theoretical Study of the Dynamic System «Vibration Platform − Polymer Concrete» Stress–Strain State. *Proceedings of the 3rd International Conference on Building Innovations. ICBI 2020. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 181*. Springer, Cham, pp 191–201. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2_19.

8. Клименко В. М., Шаповал В. Н. Вибрационная обработка металлов давлением. Киев: Техника, 1977. 128 с.

REFERENCES

1. Kuznetsov V. E. On the possibility of dynamic influence on the plastic deformation of metals. *Ferrous metallurgy*. 1993. 5, pp. 23−26. *(in Russian).*

2. Dragobetsky V. V., Martsinyuk O. B., Trotsko O. V. Resonance phenomena in the processes of changing cast billets. Transactions of KDPU. Kremenchuk. KDPU. 2006. 6/2006 (41). P. 2, pp. 25–26. *(in Russian).*

3. Savelov D. Modelling of a powder-like work-piece compaction in a stiff die by a vibro- static method. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, KRNU, Issue* 1/2015 (90), pp. 109–113 *(in Russian).*

4. Savelov D., Puzyr R., Dragobetsky V., Markevych A. Peculiarities of vibrational press dynamics with hard-elastic restraints in the working regime of metal powders molding. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. 2, pp. 67–74. *(in Russian).*

5. Savelov D. Modelling of the deformation process for dispersible and porous powder-like work-pieces. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, KRNU,* 3/2015 (92), pp. 74–78 *(in Ukrainian).*

6. Savelov D. V., Markevich A. G. Baglyuk G. A. Improvement of technology and equipment for intensification of the process of vibration-static pressing of metal powders. *Powder metallurgy: surface engineering, new powder composite materials. Welding. Collection of reports 9 international symposium April 8-10, 2015*. Minsk: Belarusian Science, pp. 196–206. (*in Russian}.*

7. Maslov O., Savielov D., Salenko Y., Javadova M. (2022) Theoretical Study of the Dynamic System «Vibration Platform − Polymer Concrete» Stress–Strain State. *Proceedings of the 3rd International Conference on Building Innovations.* ICBI 2020. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 181. Springer. Cham, pp 191–201. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2_19.

9. Klimenko V.M., Shapoval V.N. Vibration processing of metals by pressure. Kiev: Equipment. 1977. 128 p. *(in Russian).*

Drahobetskyi V., Savielov D., Moloshtan D. Resonance occurrences in processes of vibration compaction of powder preparations

The publication considered the process of deformation of a dispersed powder mixture by a vibrating working body that carries out periodic oscillations in the vertical plane. The purpose of the work is to find ways of decreasing the size of plastic deformation work in the processes of compaction of dispersive powder media during the production of powder preparations. During the phased deformation of the powder preparation with a certain angular frequency of forced oscillations, the stress state relaxes and resonance occurrences are formed near the stress concentrators. As a result of the development of multiple sliding processes, a wave of plastic deformation is formed and a vibroplastic effect develops. It was established that knowing the frequency of periodic elementary changes of the plastic course and acting on the volume deformed by an external load with the same or a similar frequency, it is possible to coordinate the course of plastic fluidity with the nature of the application of this load and, based on the combination of two periodic processes, create a vibroplastic resonance. Vibration energy is absorbed in the defect zone of the crystal lattice. This leads to an increase in the potential energy of dislocations, a decrease in the displacement of the shearing stress, and the self-organization of the dissipative system. Obtained theoretical dependences for determining the shear resistance, energy and width of the dislocation during its movement at a certain speed, natural frequency of shearing deformation, bending axisymmetric angular momentum and momentum of momentum. In the case of deformation with a frequency that lies within the synchronization band in relation to the frequency of periodic elementary shifts of plastic yield, the degree of postoperative warping was minimal, one to two orders of magnitude less than in previous cases. It was also found that in the case of using resonance occurrences in the processes of shape change of powder preparations, a significant reduction in the deformation forces and, as a result, a reduction in the work of plastic deformation was found.

Key words: *powder mix, plastic deformation, vibroplastic effect, vibration, resonance occurrences.*

Драгобецкий В. В., Савелов Д. В., Молоштан Д. В. Резонансные явления в процессах вибрационного уплотнения порошковых заготовок

В работе рассмотрен процесс деформирования дисперсной порошковой смеси вибрационным рабочим органом, совершающим периодические колебания в вертикальной плоскости. Целью работы является поиск путей уменьшения работы пластической деформации в процессах уплотнения дисперсных порошковых сред при производстве порошковых заготовок. При поэтапном деформировании порошковой заготовки с определенной угловой частотой вынужденных колебаний происходит релаксация напряженного состояния и образование вблизи концентраторов напряжений резонансных явлений. В результате развития процессов множественного скольжения формируется волна пластической деформации и развивается вибропластический эффект. При этом, зная частоту периодических элементарных сдвигов пластического течения и воздействуя на деформируемый объем внешней нагрузкой с той же или близкой частотой, можно согласовать ход пластической текучести с характером применения этой нагрузки и, на основе составления двух периодических процессов, создать вибропластический резонанс. В зоне дефектов кристаллической решетки происходит поглощение энергии колебаний. Это приводит к повышению потенциальной энергии дислокаций, уменьшению перемещения сдвигающего напряжения и самоорганизации диссипативной системы. Получены теоретические зависимости для определения сопротивления сдвигу, энергии и ширины дислокации во время движения ее с определенной скоростью, частоты сдвиговой деформации, изгибающего осесимметричного момента импульса и момента количества движения. Установлено, что в случае использования резонансных явлений в процессах формоизменения порошковых заготовок наблюдается значительное снижение деформирующих усилий и, как следствие, уменьшение работы пластической деформации.

***Ключевые слова**: порошковая смесь, пластическая деформация, вибропластический эффект, колебания, резонансные явления.*

Драгобецький Володимир Вячеславович − д-р техн. наук, професор, зав. кафедрою КрНУ ім. М. Остроградського

Drahobetskyi Volodymyr − Doctor of Technical Sciences, Full Professor of KrNU

Драгобецкий Владимир Вячеславович − д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой КрНУ им. М. Остроградского

E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

ORCID: http://orcid.org/ 0000-0001-9637-3079

Савєлов Дмитро Володимирович – канд. техн. наук, доцент КрНУ ім. М. Остроградського

Savielov Dmitry − Associate Professor of the Department of KrNU

Савелов Дмитрий Владимирович – канд. техн. наук, доцент КрНУ им. М. Остроградского

E-mail: dvsavelov@gmail.com

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5170-9621

Молоштан Дмитро Васильович – канд. техн. наук, доцент КрНУ ім. М. Остроградського

Moloshtan Dmytro − Associate Professor of KrNU

Молоштан Дмитрий Васильевич – канд. техн. наук, доцент КрНУ им. М. Остроградского

E-mail: tm@kdu.edu.ua

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8881-8541

КрНУ ім. М. Остроградського – Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук

KrNU – Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk

КрНУ им. М. Остроградского – Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, г. Кременчуг

Стаття надійшла до редакції 10.06.22 р.