

УДК 621.791.92:621.793.927

**Пулька Ч.В., д.т.н., проф.; Сенчишин В.С., к.т.н., доц.; Окіпний І.Б. к.т.н., доц.;
Сенчишин Віт. С.; Бордун В.Л.**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ЗАСТОСУВАННЯ ВІБРООБРОБЛЕННЯ В ЗВАРЮВАННІ ТА СПОРІДНЕНИХ ПРОЦЕСАХ

Анотація. У роботі розглянуто шляхи застосування віброоброблення в процесах зварювання та наплавлення деталей. Обґрунтовано, що введення механічних або ультразвукових коливань у виріб, електрод, зварювальну ванну чи технологічне оснащення дає змогу впливати на процеси кристалізації, формування структури металу, розподіл зміцнювальних фаз і рівень залишкових напружень. Проаналізовано результати досліджень щодо використання вібрації при зварюванні, індукційному, дуговому, лазерному та плазмовому наплавленні. Показано, що вібраційний вплив сприяє подрібненню структурних складових, підвищенню твердості та зносостійкості наплавленого шару, зменшенню глибини проплавлення, стабілізації геометрії валика і зниженню залишкових напружень. Особливу увагу приділено індукційному наплавленню порошкоподібним твердим сплавом ПГ-С1, де застосування вертикальної та горизонтальної вібрації забезпечує зменшення розмірів карбідних складових, рівномірніший розподіл хрому, підвищення твердості та зростання зносостійкості наплавленого металу. Встановлено, що ефективність віброоброблення залежить від частоти, амплітуди, напрямку коливань і моменту їх введення в технологічний процес. Ключові слова: віброоброблення, зварювання, наплавлення, індукційне наплавлення, механічна вібрація, ультразвукова вібрація, залишкові напруження, зносостійкість, мікроструктура.

Pulka Ch.V., Senchyshyn V.S., Okipnyi I.B., Senchyshyn Vit. S.; Bordun V.L.

APPLICATION OF VIBRATION TREATMENT IN WELDING AND RELATED PROCESSES

Abstract. The paper considers the ways of applying vibration treatment in welding and surfacing processes of machine parts. It is substantiated that the introduction of mechanical or ultrasonic vibrations into a workpiece, electrode, weld pool or technological equipment makes it possible to influence crystallization processes, metal structure formation, distribution of strengthening phases and the level of residual stresses. The results of studies on the use of vibration in welding, induction surfacing, arc surfacing, laser cladding and plasma cladding are analyzed. It is shown that vibration action contributes to the refinement of structural constituents, an increase in hardness and wear resistance of the deposited layer, a reduction in penetration depth, stabilization of bead geometry and a decrease in residual stresses. Particular attention is paid to induction surfacing with PG-S1 powdered hard alloy, where the use of vertical and horizontal vibration ensures a reduction in the size of carbide constituents, a more uniform chromium distribution, increased hardness and improved wear resistance of the deposited metal. It has been established that the effectiveness of vibration treatment depends on the frequency, amplitude, direction of oscillations and the moment of their introduction into the technological process.

Keywords: vibration treatment, welding, surfacing, induction surfacing, mechanical vibration, ultrasonic vibration, residual stresses, wear resistance, microstructure.

У сучасному машинобудуванні, ремонтному виробництві та технологіях відновлення деталей процеси зварювання і наплавлення займають важливе місце, оскільки дають змогу отримувати нероз'ємні з'єднання або формувати на робочих поверхнях шар із необхідними експлуатаційними властивостями. Дані процеси супроводжуються складними тепловими, металургійними та деформаційними явищами. У зоні дії джерела тепла відбувається локальне нагрівання металу, розплавлення присадного матеріалу, перемішування рідкої ванни, кристалізація наплавленого шару або шва, а також формування зони термічного впливу. Нерівномірне нагрівання і охолодження призводить до виникнення залишкових напружень, деформацій, структурної неоднорідності, пористості, гарячих і холодних тріщин. Тому підвищення якості зварних з'єднань і наплавлених шарів потребує не лише правильного вибору матеріалів і режимів, а й застосування додаткових технологічних операцій. Однією із таких операцій є застосування вібрації в процесах виготовлення чи оброблення готових деталей [1-5].

Суть застосування вібрації у процесах зварювання та наплавлення полягає у введенні механічних або ультразвукових коливань у виріб, електрод, зварювальну ванну, наплавлювальний інструмент або технологічне оснащення. Додаткові вібраційні процеси можуть змінювати умови кристалізації металу, характер формування шва, розподіл структурних складових, рівень залишкових напружень і механічні властивості зварних з'єднань та наплавленого металу. Тому віброоброблення доцільно розглядати не тільки як післяопераційний спосіб зняття залишкових напружень, а як ефективний технологічний фактор, який може впливати на формування властивостей металу безпосередньо під час процесу [4-5].

У працях [6, 7] досліджено вплив вібраційного навантаження на зварні з'єднання та залишкові напруження. У роботі [6] показано, що прикладання вібрації під час або після зварювання змінює мікроструктуру металу шва і сприяє зниженню залишкових напружень. Одночасно встановлено підвищення твердості металу приблизно на 25 %, що свідчить про вплив коливань не лише на напружений стан, а й на структуроутворення у металі шва. У роботі [7] розглянуто механізм вібраційного зняття напружень і встановлено, що тривала низькоамплітудна вібрація з частотою 100 Гц може забезпечувати зниження залишкових напружень до 40 %, якщо їх початковий рівень наближається до границі текучості матеріалу. Це має важливе значення для великогабаритних зварних і наплавлених конструкцій, для яких термічне зняття напружень є складним або економічно недоцільним.

Особливо перспективним є застосування вібрації не після завершення процесу, а безпосередньо під час наплавлення. У працях [8–10, 14] розглянуто індукційне наплавлення тонких плоских сталевих деталей порошкоподібними твердими сплавами з використанням горизонтальної та вертикальної механічної вібрації. Такий спосіб дає змогу формувати тонкий зносостійкий шар при порівняно незначному перемішуванні основного металу з наплавленим. У працях [8–10] запропоновано вводити вібрацію в момент початку плавлення шихти і підтримувати її до повного розплавлення та кристалізації наплавленого металу.

Слід відмітити, що вібрація в період плавлення шихти сприяє перемішуванню розплаву, вирівнюванню товщини шару, подрібненню структурних складових і зменшенню залишкових деформацій.

Авторами встановлено, що застосування горизонтальної механічної вібрації амплітудою 0,2 мм і частотою 50 Гц при індукційному напавленні порошкоподібним твердим сплавом ПГ-С1 дозволяє підвищити зносостійкість наплавленого металу в 1,4 рази, а також рівномірність товщини наплавленого шару порівняно з наплавленням без вібрації. При цьому структура металу змінюється з крупнозернистої на дрібнозернисту,

що підтверджує активний вплив механічних коливань на кристалізацію наплавленого шару. Це зумовлено тим що вплив вібрації істотно впливає на формування структури наплавленого металу. Зокрема, під дією коливань змінюються розміри карбідних складових типу $(\text{Fe}, \text{Cr})_7 \text{C}_3$ і $(\text{Fe}, \text{Cr})_3 \text{C}$, а також забезпечується рівномірніший розподіл хрому по товщині наплавленого шару. Якщо без застосування вібрації розміри структурних складових становлять 10...12 мкм, то при вертикальній вібрації вони зменшуються до 7...10 мкм, а при горизонтальній — до 3,5...7 мкм. Введення механічних коливань у процес індукційного наплавлення сприяє підвищенню експлуатаційних властивостей наплавленого шару. Зносостійкість металу зростає з 2,2 при наплавленні без вібрації до 3,1 у разі застосування вертикальної вібрації та до 3,4 — при горизонтальній. Одночасно підвищується твердість наплавленого шару: з 3500 МПа без вібраційного впливу до 4800 МПа при вертикальних коливаннях і до 5400 МПа при горизонтальній вібрації.

Застосування вібрації в процесі індукційного наплавлення є засобом керованого формування структури та експлуатаційних властивостей наплавленого шару.

У роботі [11] розглянуто дугове наплавлення з низькочастотними механічними коливаннями пласкої деталі в середовищі вуглекислого газу. Коливання здійснювали з частотою 2,5...4,5 Гц і амплітудою 3...7 мм. Встановлено, що за частоти 2,5 Гц і амплітуди 7 мм досягається найбільше підвищення твердості наплавленого металу. При використанні коливань ширина наплавленого валика збільшується у 1,3...1,8 раза, його висота зменшується у 1,2...6,4 раза, а глибина проплавлення основного металу зменшується приблизно у 2 рази. Крім того, твердість наплавленого металу може зростати на 3...53 %, а твердість металу зони термічного впливу — на 27...144 % порівняно з наплавленням без коливань [11]. Це свідчить, що низькочастотна вібрація при дуговому наплавленні впливає не тільки на структуру, а й на геометрію наплавленого валика та ступінь розбавлення шару основним металом.

У сучасних дослідженнях значну увагу приділяють також лазерному наплавленню з ультразвуковою вібрацією. У праці [12] досліджено композиційне покриття IN718/WC, сформоване методом лазерного наплавлення з ультразвуковим впливом. Встановлено, що ультразвукова дія сприяє рівномірнішому розподілу WC-частинок у металевій матриці, руйнуванню стовпчастих дендритів і подрібненню зерна. У результаті середня мікротвердість покриття підвищується на 15,6 % і досягає 475 HV0.2, коефіцієнт тертя зменшується з 0,548 до 0,452, а об'єм зношування знижується на 22,9 % порівняно з покриттям, отриманим без ультразвукового впливу [12].

Перспективним напрямом є використання ультразвуку при плазмовому наплавленні. У роботі [13] досліджено вплив ультразвукової потужності та частоти на залишкові напруження при плазмовому наплавленні залізовмісного сплаву. Встановлено, що при частоті 28 кГц залишкові напруження у сформованому шарі є найменшими. Порівняно з процесом без ультразвукового впливу вони зменшуються на 17,23 % у напрямку X і на 19,79 % у напрямку Y. При потужності ультразвуку 240 Вт максимальне зниження залишкових напружень становить 62,56 % і 63,23 % відповідно у двох напрямках [13]. Такий результат пояснюється дією акустичних потоків, кавітації та механічного перемішування розплаву, що зменшує температурний градієнт і сприяє релаксації напружень у наплавленому шарі.

Таким чином, аналіз наведених праць показує, що застосування віброоброблення у процесах зварювання та наплавлення сприяє зменшенню залишкових напружень та підвищенню експлуатаційних властивостей за рахунок подрібнення структурних складових. Ефективність вібраційного впливу залежить від частоти, амплітуди, напрямку коливань та моменту їх введення.

Аналіз показав, що віброоброблення є ефективним технологічним методом підвищення якості зварних з'єднань і наплавлених шарів, що потребує додаткових досліджень та оптимізації параметрів.

Перелік посилань

1. Рябцев І. О. Наплавка деталей машин і механізмів. — К.: Екотехнологія, 2004. — 160 с.
2. Гладкий П. В., Переpletчиков Є. Ф., Рябцев І. О. Плазменная наплавка. — К.: Екотехнологія, 2007. — 292 с.
3. V.S. Senchishin and Ch.V. Pulka. Modern methods of surfacing the tools of agricultural tillers and harvesters (Review). The Paton Welding Journal. 9/2012. P. 44-49.
4. Ch.V. Pulka O.N. Shably V.N. Baranovsky V.S. Senchishin and V.Ya. Gavrilyuk. Ways of updating the technology of induction surfacing of thin steel discs. The Paton Welding Journal. 5-6/2015. P.59-62.
5. Jose M. J., Kumar S. S., Sharma A. Vibration assisted welding processes and their influence on quality of welds // Science and Technology of Welding and Joining. — 2016. — Vol. 21, Issue 4. — P. 243–258.
6. Munsif A. S. M. Y., Waddell A. J., Walker C. A. The effect of vibratory stress on the welding microstructure and residual stress distribution // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. — 2001. — Vol. 215, № 2. — P. 99–111.
7. Walker C. A., Waddell A. J., Johnston D. J. Vibratory Stress Relief — An Investigation of the Underlying Processes // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. — 1995. — Vol. 209. — P. 51–58.
8. Calculation of size of structural constituents of metal deposited by induction method with application of mechanical vibration / V.S. Senchishin And Ch.V. Pulka // The Paton Welding Journal, 2015, №8, 31-34 pages
9. Effect of horizontal mechanical vibration on service properties of deposited metal / Ch.V. Pulka, M.I. Pidgurskyi, V.S. Senchyshyn, M.V Sharyk a V.Ya. Gavrilyuk // The Paton Welding Journal, 2019, №10, 21-25 pages
10. Influence of vibration of parts on structure and properties of metal in surfacing /Pulka Ch.V., Shably O.N., Senchyshyn V.S., Sharyk M.V., Gordan G.N.// The Paton Welding Journal, January 2012, №1, P. 23–25.
11. Novykov S. Investigation of the influence of low-frequency harmonic oscillations on deposited metal. Kovove Mater. 2022. No 5 (60), P. 315-326. doi: <https://doi.org/10.31577/km.2022.5.315>
12. Lv J., Zhou J., Peng L. et al. Microstructure and Wear Properties of IN718/WC Composite Coating Fabricated by Ultrasonic Vibration-Assisted Laser Cladding // Coatings. — 2022. — Vol. 12, № 3. — Article 412.
13. Lai Y., Yue W., Zhang Y. Effect of ultrasonic vibration on residual stress in plasma cladding of iron-based alloy // Frontiers in Materials. — 2023. — Vol. 10. — Article 1092526.
14. Структура та властивості наплавленого металу сплаву типу Сормайт-1 після природного старіння / Ч.В. Пулька, В.С. Сенчишин, І.Б. Окіпний, Віт. С. Сенчишин, Р.Т. Бішак // Автоматичне зварювання, № 6, 2023, с. 18-20