

АНИСІМОВ ВІКТОР

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-3349-1630>e-mail: anisimov@vsau.vin.ua**ГУНЬКО ІРИНА**

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0003-2868-4056>e-mail: rynagunko@vsau.vin.ua**БУРЛАКА СЕРГІЙ**

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4079-4867>e-mail: ipserhiy@gmail.com

ШЛЯХИ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ ГАЗОТЕРМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РЕМОНТУ МАШИН АПК

Автори статті розглядають проблеми споживання енергії під час ремонту машин АПК та пропонують шляхи їх вирішення через вдосконалення газотермічного напилення.

У роботі проаналізовано сучасні технології газотермічного напилення та визначено ключові аспекти, які впливають на енергоефективність цього процесу.

Ключові слова: напилення, поверхневий шар, частинка, нанесення, характеристики покриття, робоче середовище, швидкість

ANISIMOV VIKTOR, HUNKO IRYNA, BURLAKA SIRHIY

Vinnytsia National Agrarian University

WAYS OF DEVELOPMENT OF GAS THERMAL SPRAYING METHODS FOR IMPROVING ENERGY EFFICIENCY IN THE REPAIR OF AGRICULTURAL MACHINERY

The authors of the article consider the problems of energy consumption during the repair of agricultural machinery and propose ways to solve them through the improvement of gas-thermal spraying.

The paper analyzes modern technologies of gas-thermal spraying and identifies key aspects that affect the energy efficiency of this process. In particular, the use of the latest materials, optimization of spraying parameters and introduction of automated control systems are considered.

The authors of the article consider in detail the advantages and disadvantages of existing methods of gas thermal spraying, highlighting problematic issues related to energy consumption and low productivity. On the basis of this analysis, specific ways of development and improvement of methods aimed at increasing the energy efficiency of gas-thermal spraying in the repair of agricultural machines are proposed.

In particular, the article considers the possibility of using the latest energy-saving technologies, the introduction of renewable energy sources and the optimization of equipment operation processes. The prospects for the application of intelligent management and monitoring systems, which will contribute to the optimal use of energy resources, are highlighted.

This article serves as an important contribution to the understanding of the problems of energy efficiency of gas-thermal spraying in the repair of agricultural machinery and determines directions for further research and the implementation of innovative approaches in the restoration of agricultural machinery.

Keywords: spraying, surface layer, particle, application, coating characteristics, working environment, speed

Постановка проблеми

У сучасних умовах відновлення сільськогосподарської техніки, газотермічне напилення визнано ефективним методом, однак виникає серйозна проблема енергоефективності цього процесу. Ремонт машин в сфері агропромислового комплексу (АПК) невіддільно пов'язаний зі споживанням значних енергетичних ресурсів, що призводить до підвищених витрат та впливає на економічну стійкість галузі.

Основною проблемою, яку необхідно вирішити, є неефективне використання енергії під час газотермічного напилення, що веде до великої кількості втрат та збільшення витрат на ремонтні роботи. Недоліки та обмеження існуючих методів газотермічного напилення призводять до низької продуктивності процесу та збільшення викидів в атмосферу.

Додатковою складністю є нестабільність цін на енергоресурси, що робить сільськогосподарські підприємства вразливими до коливань на ринку та погіршує їх фінансове положення. Таким чином, вирішення проблеми енергоефективності газотермічного напилення стає актуальним завданням для підвищення конкурентоспроможності сільськогосподарського виробництва та забезпечення сталого розвитку АПК.

Аналіз останніх джерел

Аналіз останніх досліджень у галузі газотермічного напилення для відновлення машин АПК можна розділити на декілька секцій. Перша секція зосереджена на вдосконаленні матеріалів і технологій, призначених для збільшення міцності та стійкості відновлених деталей. Особлива увага приділяється розробці технологій, які оптимізують процес напилення для досягнення оптимальних властивостей покриття.

Другий аспект стосується енергоефективності та сталості процесу газотермічного напилення. Дослідження спрямовані на зменшення енерговитрат під час цього процесу та підвищення його сталості.

Розглядаються нові методи управління енергією, оптимізація параметрів та використання відновлюваних джерел енергії.

Третя секція тексту розглядає автоматизацію та інтелектуальні системи в контексті газотермічного напилення. Використання автоматизованих систем управління та моніторингу покращує точність та ефективність процесу. Інтеграція штучного інтелекту допомагає удосконалити процеси та виявляти можливі аномалії.

Четверта частина зосереджується на стійкості до зносу та абразії. Останні дослідження направлені на розробку покриттів, які володіють високою стійкістю до зносу та абразії, що є ключовим для сільськогосподарської техніки, піддається великим фізичним навантаженням.

Метою роботи є системний аналіз та огляд сучасних досліджень у галузі газотермічного напилення з метою виявлення і пропозиції нових шляхів розвитку методів, спрямованих на підвищення енергоефективності процесу відновлення сільськогосподарських машин.

Виклад основного матеріалу

Газотермічні методи напилення покриттів почали активно розвиватися з кінця п'ятдесятих років двадцятого століття [1, 2]. На сьогоднішній день процес газотермічного напилення отримав розширення у різних варіаціях. Відповідно до ГОСТ 28076, залежно від джерела теплоти, газотермічне напилення класифікується на такі види: газополум'яне напилення, плазмове напилення, плазмове-дугове напилення, високочастотне плазмове напилення, детонаційне напилення, напилення в контрольованій атмосфері.

Основними недоліками традиційних методів газотермічного напилення є: порівняно низька адгезія між покриттям та основним матеріалом, наявність залишкової пористості, висока трудомісткість підготовки поверхні деталі до відновлення і інше. Зазвичай напилені шари не підвищують міцність виробу, а під час напилення виникають труднощі із нанесенням покриття на внутрішні поверхні деталей, такі як отвори для підшипників [1-4].

Рис. 1 демонструє схему розвитку та розташування в часовому діапазоні різних методів газотермічного напилення в залежності від швидкості на пілоподібній основі [2].

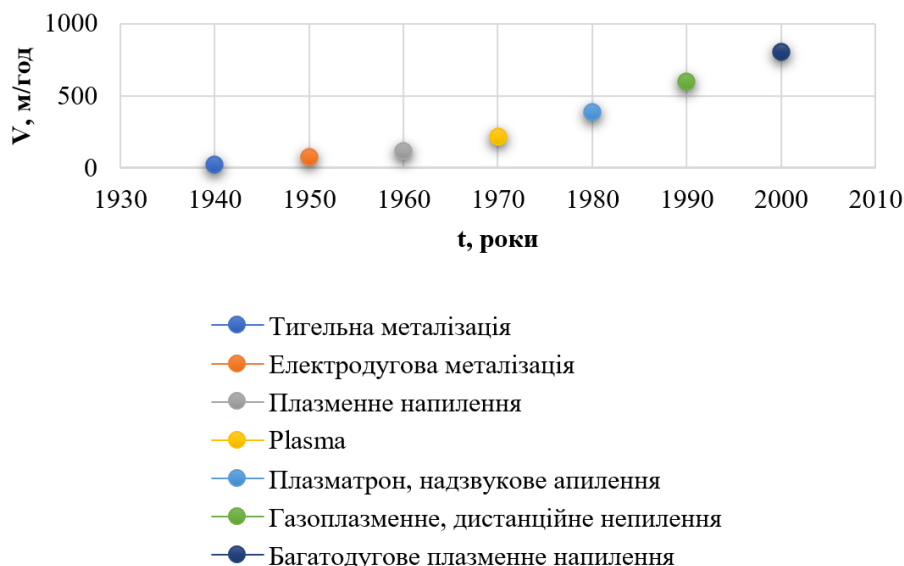


Рис. 1. Хронологічна залежність швидкості частинок порошку для деяких способів газотермічного напилення

Аналізуючи представлені дані, відзначається, що в останні роки спостерігається зростання інтересу та розвитку нових методів газотермічного напилення, таких як надзвукове газополум'яне напилення, надзвукове плазмове напилення та надзвукове газодинамічне напилення.

Способи отримання газотермічних покриттів із надзвуковою швидкістю частинок отримали у світовій практиці назву «High-Velocity-Oxygen-Fuel» (HVOF), що означає «Висока швидкість-Кисень-Паливо», та система «High-Velocity-Air-Fuel» (HVOF), що означає «Висока швидкість-Кисень-Паливо».

Система «HVOF» використовує стиснене повітря як окислювача та хлор у якості агента для охолодження під час згорання [5]. Покриття, отримані цими методами, вирізняються високою адгезією, низькою пористістю та можуть конкурувати з покриттями, отриманими методом детонаційного напилення.

Надзвукове газополум'яне напилення використовує надзвукові пістолети, такі як "Jet-Coat", "Top-Gun", "Top-Gun-K", "Carbide-Jet" та ін., для отримання покриттів [1]. Зазвичай, під час напилення використовують кисень (або стиснене повітря) та газ. Наприклад, для "газового напилювання" необхідно приблизно 21 л/год газу та 11 балонів/год кисню [1].

Навіть при високій якості отримуваних покриттів, цей метод застосовується обмежено. В Україні розроблено обладнання для надзвукового газополум'яного напилення, яке використовується для отримання зносо- та корозійностійких покриттів [7].

Надзвукове плазмове напилення поділяється на струминне та каналове. При струминному напиленні

порошок вводиться в надзвуковий потік, що призводить до різних змін швидкостей частинок при їхньому нанесенні на поверхню. Це може призводити до шарування структури покриття, від щільного до звичайного [8].

Значно кращі результати за щільністю та міцністю зчеплення з основою можна досягти при "каналовому" надзвуковому плазменному напиленні. У цьому випадку частинки порошку вводяться в потік перед виходом із сопла, рухаючись вздовж каналу, де вони нагріваються і потім виходять у струмінь. При цьому низька швидкість частинок порошку практично не враховується, і їхні швидкості польоту приймають значення, близькі до максимальних.

Також відомий метод багатодугового плазмового напилення, який має певні переваги з точки зору вигідності електроживлення плазмотронів.

Надзвуковий газодинамічний спосіб напилення (ГДН) був винайдений в 80-х роках XX століття та використовує ефект закріплення твердих частинок, що рухаються надзвуковою швидкістю, на поверхні при співударенні з нею.

У ГДН металічні частки, які перебувають у твердому стані, прискорюються потоком надзвукового газу до швидкості кілька сотень метрів в секунду і наносяться на поверхню деталі під час високошвидкісного удару. Зіштовхуючись з поверхнею, частинки кріпляться, утворюючи суцільне покриття. Цей процес відбувається за умови, коли температура частинок порошку зазвичай значно нижча за їхню температуру плавлення.

Якщо порошок, який наноситься, є сумішшю двох компонентів - пластичного металу (наприклад, алюмінію чи його сплаву) та порошку кераміки чи більш твердого металу (корунд Al₂O₃), процес відрізняється. І взаємодія цих частинок з поверхнею деталі суттєво відрізняється. Внаслідок високошвидкісного удару частки кераміки не деформуються, або відскакують від поверхні, або вбираються в неї, створюючи міцне механічне зчеплення з основою. Благодаря бризговому впливу високошвидкісних частинок, ефективно відбувається процес формування надійного покриття. Шляхи розвитку методів газотермічного напилення зорієнтовані на покращення енергоефективності процесів ремонту машин АПК. Одним з підходів є вдосконалення "каналового" надзвукового плазменного напилення, де частинки порошку введені в потік перед виходом із сопла, що дозволяє досягти кращих результатів за щільністю та міцністю зчеплення з основою.

Крім того, розглядаються методи багатодугового плазмового напилення, які мають певні переваги з точки зору вигідності електроживлення плазмотронів.

Надзвуковий газодинамічний спосіб напилення (ГДН) є об'єктом досліджень для покращення енергоефективності. Цей метод використовує ефект закріплення твердих частинок, що рухаються надзвуковою швидкістю, для нанесення покриття на поверхню деталі при співударі з нею. Вдосконалення процесу ГДН може призвести до збільшення ефективності та якості напилення.

Загальний напрямок розвитку включає також вивчення впливу складу порошків, їхніх температурних характеристик та взаємодії з поверхнею основи на процес формування покриття. Це сприяє оптимізації енергоефективності та стійкості отриманих напилених шарів.

Таким чином, розвиток методів газотермічного напилення для ремонту машин АПК спрямований на підвищення енергоефективності, поліпшення якості покриттів та забезпечення стійкості процесів напилення.

Висновки

У підсумку можна констатувати, що розвиток методів газотермічного напилення представляє значущий потенціал для покращення енергоефективності процесів ремонту машин АПК. Вдосконалення "каналового" надзвукового плазменного напилення, багатодугового плазмового напилення та надзвукового газодинамічного напилення є ключовими напрямками досліджень.

Оптимізація складу порошків, їхніх температурних характеристик та взаємодії з поверхнею деталі також відіграє важливу роль у покращенні ефективності та якості напилення. Застосування новітніх технологій, таких як "High-Velocity-Oxygen-Fuel" (HVOF) та "High-Velocity-Air-Fuel" (HVOF), дозволяє отримувати покриття з високою адгезією та низькою пористістю.

Дослідження впливу енергоефективних методів, автоматизації та застосування інтелектуальних систем на процес газотермічного напилення підкреслюють необхідність комплексного підходу до вдосконалення цих технологій. Важливим є також забезпечення екологічної стійкості процесів напилення для мінімізації негативного впливу на довкілля.

Основними викликами залишаються покращення адгезії покриття та основного матеріалу, зменшення залишкової пористості, ефективна підготовка поверхні до відновлення, а також дослідження можливостей для напилення внутрішніх поверхонь деталей.

Література

1. Калетнік Г., Адамчук В., Булгаков В., Кравчук В. Про концепцію сучасного розвитку вітчизняної сільськогосподарської техніки. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. 2014. Вип. 18. С. 19–28.
2. Elgersma A., Soegaard K., Jensen S. K. Vitamin contents in forage herbs. Aspects of Applied Biology. 2012. Vol. 115. P. 75–80.

3. Xianzhe Z., Lan Y., Jianying W., Hangfei D. Process analysis for an alfalfa rotary dryer using an improved dimensional analysis method. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2009. Vol. 2 (3). P. 76–82. DOI: 10.3965/j.issn.1934-6344.2009.03.076-082
4. Gallego A., Hospido A., Moreira M. T., Feijoo G. Environmental assessment of dehydrated alfalfa production in Spain. *Resources, Conservation and Recycling*. 2011. Vol. 55 (11). P. 1005–1012. DOI: 10.1016/j.resconrec.2011.05.010
5. Бурлака С. А. Алгоритм функціонування машинно-тракторного агрегату з використанням системи живлення зі змішувачем палив. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2022. № 1 (305). С. 140–145.
6. Бурлака С. А., Явдик В. В., Єленич А. П. Методи досліджень та способи оцінки впливу палив з відновлюваних ресурсів на роботу дизельного двигуна. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2019. № 2 (271). С. 212–220.
7. Гунько І. В., Бурлака С. А. Математичне моделювання роботи системи живлення дизельного двигуна працюючого на біопаливі з дросельним регулювання складу паливної суміші. *The scientific heritage*. 2020. № 50. С. 34–39.

References

1. Kaletnik G., Adamchuk V., Bulgakov V., Kravchuk V. About the concept of modern development of domestic agricultural machinery. Technical and technological aspects of development and testing of new equipment and technologies for agriculture in Ukraine. 2014. Issue 18. P. 19–28.
2. Elgersma A., Soegaard K., Jensen S.K. Vitamin contents in forage herbs. *Aspects of Applied Biology*. 2012. Vol. 115. P. 75–80.
3. Xianzhe Z., Lan Y., Jianying W., Hangfei D. Process analysis for an alfalfa rotary dryer using an improved dimensional analysis method. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2009. Vol. 2 (3). P. 76–82. DOI: 10.3965/j.issn.1934-6344.2009.03.076-082
4. Gallego A., Hospido A., Moreira M. T., Feijoo G. Environmental assessment of dehydrated alfalfa production in Spain. *Resources, Conservation and Recycling*. 2011. Vol. 55 (11). P. 1005–1012. DOI: 10.1016/j.resconrec.2011.05.010
5. Burlaka S. A. Algorithm of the operation of a machine-tractor unit using a power supply system with a fuel mixer. *Herald of Khmelnytskyi National University*. 2022. No. 1 (305). P. 140–145.
6. Burlaka S. A., Yavdyk V. V., Yelenich A. P. Research methods and ways of assessing the influence of fuels from renewable resources on the operation of a diesel engine. *Herald of Khmelnytskyi National University*. 2019. No. 2 (271). P. 212–220.
7. Gunko I. V., Burlaka S. A. Mathematical modeling of the power system operation of a diesel engine running on biofuel with throttle control of the fuel mixture composition. *The scientific heritage*. 2020. No. 50. P. 34–39.