



Научные технологии в машиностроении. 2022. №3 (129). С. 27-31.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №3 (129). P. 27-31.

Обзорная статья
УДК 534-8
doi: 10.30987/2223-4608-2022-3-27-31

Применение гибридных ультразвуковых технологий для получения функциональных покрытий

Вячеслав Михайлович Приходько¹, д.т.н.,
Дмитрий Сергеевич Симонов², аспирант, Александр Вадимович Сухов³, аспирант,
Дмитрий Сергеевич Фатюхин⁴, д.т.н., Софья Александровна Фомушкина⁵, студент
^{1,2,3,4,5}Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
125319, г. Москва, Россия
²dimsimonov94@mail.ru, ³sukhov-aleksandr96@mail.ru,
⁴mitriy2@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5914-3415> ⁵lefmo@yandex.ru

Аннотация. В статье проанализированы требования, предъявляемые к различным функциональным покрытиям. Рассмотрена интеграция ультразвуковых технологий в процессы получения функциональных покрытий с целью повышения их качества.

Ключевые слова: ультразвук, колебания, кавитация, покрытия, гибридные технологии

Благодарность: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00660, <https://rscf.ru/project/21-19-00660>.

Для цитирования: Приходько В.М., Симонов Д.С., Сухов А.В., Фатюхин Д.С., Фомушкина С.А. Применение гибридных ультразвуковых технологий для получения функциональных покрытий // Научные технологии в машиностроении. – 2022. – №3 (129). – С. 27-31. doi: 10.30987/2223-4608-2022-3-27-31.

Review article

Application of hybrid ultrasonic technologies for obtaining functional coatings

Vyacheslav M. Prikhodko¹, Dr. Sc. Tech.,
Dmitry S. Simonov², Post graduate student, Alexander V. Sukhov³, Post graduate student,
Dmitry S. Fatyukhin⁴, Dr. Sc. Tech., Sofya A. Fomushkina⁵, student
^{1,2,3,4,5} Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI), 125319, Moscow, Russia
²dimsimonov94@mail.ru, ³sukhov-aleksandr96@mail.ru,
⁴mitriy2@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5914-3415> ⁵lefmo@yandex.ru

Annotation. The article analyzes the requirements for various functional coatings. The integration of ultrasonic technologies into the processes for obtaining functional coatings in order to improve their quality has been viewed.

Keywords: ultrasound, vibrations, cavitation, coatings, hybrid technologies

Acknowledgements: The research was supported by RSF grant no.21-19-00660, <https://rscf.ru/project/21-19-00660>.

For citation: Prikhodko V.M., Simonov D.S., Sukhov A.V., Fatyukhin D.S., Fomushkina S.A. Application of hybrid ultrasonic technologies for obtaining functional coatings. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no.3 (129), pp. 27-31. doi: 10.30987/2223-4608-2022-3-27-31.

Машиностроение является особо важной отраслью в промышленном комплексе Рос-

сийской Федерации, в связи с чем для обеспечения высокой конкурентоспособности това-

ров отечественного производства на внешних рынках постоянно растут требования к качеству производимой продукции и её эксплуатационным свойствам. Для повышения конкурентоспособности изделий машиностроения ведутся работы по повышению надежности и долговечности изделий машиностроения, которые зависят от устойчивости изделий к износу, циклическим контактными нагрузкам, а также от их коррозионной стойкости. Для успешного противодействия этим факторам в настоящее время применяют различные функциональные покрытия.

Классификация функциональных покрытий

Классифицировать функциональные покрытия можно по различным признакам, например, по методу нанесения [1]. Согласно этой классификации, к функциональным покрытиям относят:

– диффузионные – покрытия, получаемые в результате диффузии в защищаемый металл атомов защитного вещества в твердой, жидкой или газообразной фазе при высокой температуре;

– термомеханические – покрытия, образующиеся в результате термомеханической обработки защищаемого и защитного металла путем прокатки или протяжки при нагреве;

– химические – покрытия, полученные методом восстановления ионов металлов. Используют покрытия из переходных и благородных металлов, металлических сплавов и сплавов металлов с углеродом, фосфором, бором;

– наплавочные – покрытия, наносимые методами сварки или другими способами;

– газотермические – покрытия, получаемые методами напыления (газопламенного, плазменного и детонационного), при которых разогретые мельчайшие частицы разгоняются выходящим из сопла плазматрона сжатым газом и направляются на покрываемую поверхность, формируя функциональный слой;

– гальванические – покрытия, получаемые электрокристаллизацией. Отличаются чистой осажденными металлами, коррозионной стойкостью, хорошими механическими свойствами, экономичностью. Наиболее распространены покрытия никелем, оловом, медью, цинком, хромом, серебром и др. металлами;

– лакокрасочные – покрытия, получаемые путем нанесения на поверхность металла одного или нескольких слоев лака или краски;

– комбинированные – покрытия, представляющие собой комбинации гальванических, оксидных, лакокрасочных и др. видов покрытий, граничащих между собой на одной детали или изделии.

В изделиях машиностроения широкое применение нашли диффузионные, газотермические, гальванические и лакокрасочные покрытия.

К диффузионным покрытиям традиционно относят цементацию, азотирование, цианирование, борирование и др. Основными требованиями к функциональным поверхностям данного типа являются обеспечение необходимой поверхностной твердости покрытия, а также глубины получаемого слоя. Повышение этих характеристик является актуальной задачей.

К газотермическим покрытиям относят газопламенное и плазменное напыления, а также электродуговую металлизацию. К покрытиям данного типа предъявляются требования по толщине напыленного слоя, адгезии, а также пористости покрытия. Стоит отметить, что для некоторых классов покрытий контроль пористости обязателен, при этом значения пористости определяют качество технологического процесса напыления. Также большое внимание уделяется вопросу обеспечения адгезии покрытия.

Из электрохимических методов нанесения покрытий наиболее распространенным является гальванический способ осаждения металлов и сплавов. Основными проблемами отмечаются слабая адгезия, повышенная шероховатость на поверхности покрытия, местные непокрытия и разнотолщинность покрытия.

Для лакокрасочного покрытия основными требованиями являются обеспечение необходимой адгезии, твердости покрытия, а также укрывистости.

Подготовка поверхности для нанесения покрытий с использованием ультразвука

Особое внимание при работе с функциональными покрытиями уделяется подготовке поверхности, поскольку именно подготовка обеспечивает необходимую для долговечного использования покрытия адгезию. В некоторых случаях, помимо очистки поверхности создается также определенная шероховатость поверхности [2]. Кроме того, в [2] показано, что на качество покрытия в случае плазменного метода положительно влияет искусственно созданный переходный слой.

Повысить качество подготовки поверхностей перед нанесением покрытий могут ультразвуковые колебания, применение которых целесообразно на следующих этапах:

- очистка поверхностей;
- создание необходимой шероховатости для обеспечения высокой адгезии покрытия;
- обеспечение мероприятий по увеличению глубины слоя покрытия в случае диффузионных методов.

Сравнение ультразвуковой очистки с другими методами удаления загрязнений (струйная очистка, очистка в растворах технических моющих средств, механическая очистка и др.) убедительно показывает, что ультразвуковой метод дает недостижимое другими способами качество очистки [3]. Основными эффектами, определяющими механизм процесса ультразвуковой очистки, являются кавитация и акустические течения [4]. Большое значение при очистке от загрязнений играет кавитация, сопровождающаяся захлопыванием кавитационных пузырьков и образованием интенсивных ударных (кумулятивных) воздействий [5]. При этом эффективна очистка как газовыми, так и паровыми пузырьками [6].

Применение ультразвуковых колебаний позволяет интенсифицировать процесс очистки за счет эффектов, возникающих при излучении колебаний в технологическую среду. Также применение ультразвуковой обработки позволяет совмещать различные процессы. Например, в [7] показан синтез очистки и разборки деталей машиностроения, что позволяет существенно сократить время подготовки к дальнейшей обработке.

Помимо очистки, обработкой ультразвуковыми колебаниями можно добиться шероховатости поверхности, отвечающей требованиям для поверхностей, на которые наносятся функциональные покрытия. Это достигается как за счет кавитационной эрозии, что происходит в случае возникновения кавитации в технологической среде, так и за счет абразивной эрозии, если в технологическом объеме присутствуют абразивные частицы. В таком случае возникает ряд эффектов, на которых основаны кавитационно-эрозионная (КЭО) и кавитационно-абразивная обработка (КАО).

Применение КАО позволяет получить на поверхности обрабатываемой детали развитый субмикрорельеф, что является следствием активного кавитационно-абразивного разрушения в ультразвуковом поле. При этом отмеча-

ется [8], что время КАО до получения установленных параметров шероховатости в 1,2 раза меньше времени, чем при виброабразивной обработке без применения ультразвука. Также КАО является эффективным способом для получения необходимой шероховатости при обработке материалов, полученных аддитивными технологиями [9].

Кроме применения УКЭО и КАО, обеспечить необходимую шероховатость возможно методом ультразвукового поверхностно-пластического деформирования (ППД). В [10] говорится, что в технологиях газотермического напыления, с целью активации поверхности и обеспечения механического сцепления покрытия с основой, обязательным условием подготовки поверхности является придание ей определенной шероховатости путем струйно-абразивной обработки или нанесения рваной резьбы. В источнике показано сравнение струйно-абразивной обработки, ультразвукового ППД и шлифования для подготовки поверхности перед детонационным и газопламенным напылением. Несмотря на то, что шероховатость после ультразвукового ППД сравнима с шероховатостью, достигнутой шлифованием, адгезия функционального покрытия в таком случае выше, при этом микро-рельеф поверхности более равномерен.

Однако возможность получения необходимой шероховатости напрямую зависит от твердости материала. Например, в [11] рассматривается влияние твердости заготовки на изменение шероховатости поверхности во время ультразвуковой магнитно-абразивной чистовой обработки. С увеличением твердости поверхности детали, изменение шероховатости поверхности, полученной при чистовой обработке, уменьшается. Это связано с тем, что для более мягких материалов глубина вдавливания (или площадь горизонтальной проекции), полученная для аналогичных условий больше. Кроме того, неровности с более низкой прочностью могут легко срезаться. Высокая твердость материала снижает роль деформации, и уменьшение шероховатости поверхности происходит в основном за счет удаления неровностей с поверхности, что приводит к уменьшению скорости снижения шероховатости поверхности [11].

Помимо очистки поверхности и обеспечения шероховатости ультразвук способен изменять характеристики поверхности.

Известно, что увеличение дефектов кри-

сталлического строения металлических сплавов ускоряет диффузионные процессы. Для повышения эффективности диффузионных процессов рядом авторов предлагается использовать способы холодной пластической деформации. Одним из наиболее распространенных методов ППД является ультразвуковой метод.

В [12] показано, что предварительная модификация поверхностного слоя стали 40Х13 ультразвуковой финишной обработкой интенсифицирует процессы нитридообразования при высокоинтенсивной имплантации ионами азота. Повышение дефектности поверхностного слоя увеличивает глубину азотированного слоя, меняет соотношение фаз и, соответственно, его механические свойства.

Также применение ультразвука благоприятно сказывается на подготовке поверхности перед нанесением плазменного покрытия. В работе [2] описан метод ультразвуковой обработки, результатом которого является переходная зона на поверхности основной детали, состоящая из частиц материала покрытия.

В отличие от гидроабразивной обработки, где ультразвуковые колебания передаются жидкости, в которой находятся абразивные частицы, в описанном способе ультразвуковые колебания при одновременном статическом давлении передаются основе частицами порошка покрытия. За счет такой обработки происходит внедрение частиц материала покрытия в поверхность обрабатываемой детали, что позволяет обеспечить высокую степень шероховатости и пластической деформации, иными словами, позволяет повысить адгезию наносимого покрытия за счет модернизации поверхности.

Применение ультразвуковых колебаний позволяет объединить создание шероховатости поверхности определенной конфигурации и предварительную модификацию обрабатываемой поверхности. В таком случае достигаются одновременно высокие показатели маслостойкости и глубины нанесенного диффузионного слоя.

Заключение

Проведенный анализ показал, что ультразвуковые колебания являются эффективным способом для модернизации процессов подготовки поверхности. Синтез ультразвуковой технологии с уже используемыми технологиями позволяет как сократить время обра-

ботки, так и повысить качество получаемых функциональных покрытий.

Для рассматриваемых в статье покрытий основными параметрами, определяющими эксплуатационные свойства, являются: для гальванических, лакокрасочных и полимерных – адгезия покрытия к поверхности; для диффузионных – глубина упрочнённого слоя и твёрдость.

Эффективность применения ультразвуковой обработки обусловлена комплексным воздействием на поверхность, заключающимся в одновременной очистке поверхности, изменении шероховатости на микро-, субмикронном уровне, и изменении микротвёрдости.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лобанов, М.Л., Кардонина, Н.И., Россина, Н.Г., Юровских, А.С. Защитные покрытия: учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 200 с.

2. Ультразвуковое модифицирование поверхности и его влияние на свойства покрытий / В.А. Клименов, Ж.Г. Ковалевская, П.В. Уваркин и др. // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – №S1-2. – С. 157-160.

3. Райский, В.В. Васильев, А.А. Подготовка поверхности для плазменного покрытия // Международная научно-практическая конференция "интеграция Отечественной науки в мировую: проблемы, тенденции и перспективы": сборник научных докладов, Москва, 26-29 сентября 2014 года. – Москва: Автономная некоммерческая организация содействия развитию современной отечественной науки Издательский Дом «Научное обозрение», 2014. – С. 356-363.

4. Нигметзянов, Р.И., Сундуков, С.К., Сухов, А.В., Фатюхин, Д.С. Ультразвуковой способ получения моющих пен // Вестник машиностроения. – 2018. – № 12. – С. 78-82.

5. Numerical simulation of underwater explosion cavitation characteristics based on phase transition model in compressible multicomponent fluids / Jun Yu, Jian-hu Liu, Hai-kun Wang, Jun Wang, Lun-ping Zhang, Guo-zhen Liu // Ocean Engineering, 2021, Vol. 240.

6. Comparing cleaning effects of gas and vapor bubbles in ultrasonic fields / Ryeol Park, Minsu Choi, Eun Hyun Park, Won-Jun Shon, Ho-Young Kim, Wonjung Kim // Ultrasonics Sonochemistry, 2021, Vol. 76.

7. Приходько, В.М., Нигметзянов, Р.И., Фатюхин, Д.С. Совмещенный процесс ультразвуковой разборки и очистки деталей машин // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2011. – №5. – С. 36-40.

8. Тамаркин, М.А., Тищенко, Э.Э., Вяликов, И.Л. Теоретические основы повышения эффективности виброабразивной обработки при наложении ультразвукового поля // Вестник машиностроения. – 2015. – №7. – С. 38-41.

9. **Тан, К.Л., Yeо, S.H.** Surface modification of additive manufactured components by ultrasonic cavitation abrasive finishing // *Wear*, Vol. 378-379, 2017, P. 90-95.

10. **Зайцев, К.В., Фазлеев, Р.Р.** Применение ультразвука при нанесении покрытий // *Современные проблемы науки и образования*. – 2014. – №5. – с. 204.

11. **Misra Aviral, Pandey Pulak M., Dixit U.S.** Modeling and simulation of surface roughness in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing process // *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 133, 2017, P. 344-356.

12. **Гольдберг, М.М.** Лакокрасочные покрытия в машиностроении Справочник. Изд. 2-е, переработ. и доп. / Под ред. М. М. Гольдберга. – М.: Машиностроение, 1974. – 576 с.

REFERENCES

1. Lobanov, M.L., Cardonina, N.I., Rossina, N.G., Yurovskikh, A.S. Protective coatings: textbook. /Yekaterinburg: Ural University Publishing House, 2014, 200 p.

2. Ultrasonic modification of the surface and its effect on the properties of coatings / V.A. Klimenov, Zh.G. Kovalevskaya, P.V. Uvarkin et al. / *Physical Mesomechanics*, 2004, vol. 7, no. S1-2, pp. 157-160.

3. Raisky, V.V. Vasiliev, A.A. Surface preparation for plasma coating. *Integratsia Otechestvennoy nauki v mirovuyu: problemi, tendentsii i perspektivi*. [Integration of Russian Science into the world: problems, trends and prospects. Proc. Int. Sci. Conf], Moscow, September 26-29, 2014. Moscow: Autonomous Non-profit Organization for the Promotion of Modern Domestic Science, Publishing House "Scientific Review", 2014, pp. 356-363.

4. Nigmatzyanov, R.I., Sundukov, S.K., Sukhov, A.V., Fatyukhin, D.S. Ultrasonic method for obtaining detergent foams. /*Bulletin of Mechanical Engineering*, 2018, no. 12. pp. 78-82.

5. Numerical simulation of underwater explosion cavitation characteristics based on phase transition model in compressible multicomponent fluids / Jun Yu, Jian-hu Liu, Hai-kun Wang, Jun Wang, Lun-ping Zhang, Guo-zhen Liu // *Ocean Engineering*, 2021, Vol. 240.

6. Comparing cleaning effects of gas and vapor bubbles in ultrasonic fields / Ryeol Park, Minsu Choi, Eun Hyun Park, Won-Jun Shon, Ho-Young Kim, Wonjung Kim // *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, Vol. 76.

7. Prikhod'ko, V.M., Nigmatzyanov, R.I., Fatyukhin, D.S. Combined process of ultrasonic disassembly and machinery cleaning. /*Assembling in Mechanical Engineering, Instrument-Making*, 2011, no. 5, pp. 36-40.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 13.12.2021; одобрена после рецензирования 17.12.2021; принята к публикации 30.12.2021.

The article was submitted 13.12.2021; approved after reviewing 17.12.2021; accepted for publication 30.12.2021.

