

УДК 621.793.74: 532.528

doi:10.18720/SPBPU/2/id-166

С.Ю. Жачкин¹, Г.И. Трифонов²

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАВИТАЦИОННОЙ ЭРОЗИИ ПЛАЗМЕННОГО КОМПОЗИТНОГО ПОКРЫТИЯ



¹Сергей Юрьевич Жачкин,
Федеральное государственное казённое военное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования Военный учебно-научный центр Военно-
воздушных сил «Военно-воздушная академия имени
профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

Россия, Воронеж, Тел.: 8-908-149-96-32, E-mail: zhach@list.ru.



²Григорий Игоревич Трифонов,
Федеральное государственное казённое военное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования Военный учебно-научный центр Военно-
воздушных сил «Военно-воздушная академия имени
профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

Россия, Воронеж, Тел.: 8-915-548-82-41, E-mail: i@trifonov.ru.

Аннотация

В работе сравнивается кавитационная эрозия стальных образцов марки 30X10Г10 и образцов с композитным покрытием. Размер образцов — 200×200×10 мм. Композитное покрытие наносилось плазменным методом из смеси двух компонентов: самофлюсующийся сплав на железной основе (фракция 20–63 мкм, 88,7%) и порошок карбида титана (фракция 43–44 мкм, 11,3%). Исследования показали, что частицы карбида титана (TiC) в покрытии действуют как скользящие дислокации, предотвращая образование и рост микротрещин, а также отслоение покрытия.

Ключевые слова: композитное покрытие, плазменное напыление, микротвердость, кавитационная эрозия, карбид титана.

Введение

Известно, что кавитационная эрозия (далее – КЭ) способна привести к разрушению гидрооборудования и полной потере работоспособности гидрофицированных машин в течение короткого промежутка времени, иногда за 2-3 часа эксплуатации [1, 2].

Причина возникновения КЭ связана с высокой скоростью потока и изменениями внутреннего давления в жидкости. Колебания давления создают кавитационные пузырьки, которые взрываются при снижении локального давления до уровня насыщенного пара. Это приводит к повреждению поверхности материалов из-за ударной волны или микроструи.

Кавитационная стойкость, как и износостойкость и коррозионная стойкость, является поверхностным свойством и в большей степени зависит от характеристик поверхности материала, а не от его объемных свойств. Следовательно, технология модификации поверхности может стать эффективным способом решения вышеуказанных проблем.

При выборе матрицы для композитного материала покрытия было учтено, что металлические композиты с железной матрицей представляют собой одни из наиболее инновационных материалов, доступных на современном рынке [3, 4]. Эти материалы сочетают в себе исключительную прочность и лёгкость, что делает их уникальными и подходящими для широкого спектра применений [5, 6].

Металлические композиты с железной матрицей обладают высокой коррозионной стойкостью. Хотя чистое железо подвержено окислению и коррозии, добавление специальных наполнителей защищает матрицу от разрушения. Эти материалы долговечны и подходят для использования в самых разных и сложных условиях.

В качестве наполнителя в работе были использованы частицы карбида титана (TiC), которые, благодаря своим уникальным свойствам, таким как стабильность, высокая температура плавления (3100 °C) и исключительная твёрдость (~3000HV), вызвали значительный интерес в сфере повышения прочности и износостойкости композитных материалов [7-9].

Так, в работе [10] сравнивались комплексные характеристики покрытий из нержавеющей стали 12CrNi₂, полученных с использованием технологии ионной плазменной наплавки с добавлением частиц TiC непосредственно на месте и порошка TiC, который добавлялся отдельно. Результаты показали, что композитное покрытие с 50 массовыми процентами частиц TiC обладает наилучшей износостойкостью. Однако большинство исследований были сосредоточены на упрочнении поверхности деталей машин. Толщина слоя покрытия в этих работах не

превышала 20 мкм, что делает их непригодными для восстановительных операций.

Подводя итоги анализа, установим, что для проведения исследований было выбрано композитное покрытие, изготовленное на основе порошка на железной основе- ПР-Х11Г4СР, В состав этого покрытия были добавлены частицы наполнителя TiC.

Таким образом цель работы заключается в проведении экспериментальных исследований, направленных на оценку сопротивления кавитационной эрозии стальной основы образца и композитного покрытия, созданного из специально разработанного материала.

Методы

В ходе эксперимента по плазменной наплавке применялась установка плазменного нанесения покрытий УПНС-3040.

В качестве основы был выбран порошок ПР-Х4ГСР с фракцией от 40 до 64 микрометров. В качестве наполнителя был использован TiC. Далее был проведён многофакторный эксперимент по центральному композиционному плану [11].

Были определены диапазоны изменения независимых переменных: размер наполнителя (Н) варьировался от 30 до 70 мкм, а его концентрация (С) – от 10 до 30%. В качестве функции отклика была выбрана прочность сцепления покрытия с основой. На основе этих данных было получено уравнение (1) [12], которое описывает зависимость прочности сцепления от размера наполнителя и его концентрации в композитном материале. Для верификации корректности выбранной модели был применён критерий Фишера [11, 13], который подтвердил её адекватность. Так, регрессионное уравнение приняло вид:

$$\sigma = 91,49 + 4,33H - 0,05H^2 + 2,04C - 0,09C^2, \quad (1)$$

Визуальное представление результатов анализа в виде графика (рисунок 1), отображающих контуры желательности, наглядно демонстрирует, как адгезионные свойства композитного покрытия зависят от исследуемых параметров.

Затем были определены оптимальные параметры, исходя из максимальной адгезии покрытия к основе. Размер частиц наполнителя составил 43,3 микрометра, а его концентрация – 11,3%. Технологические режимы плазменного напыления композитного покрытия были выбраны на основании предыдущих исследований с целью обеспечения высокого качества покрытия.

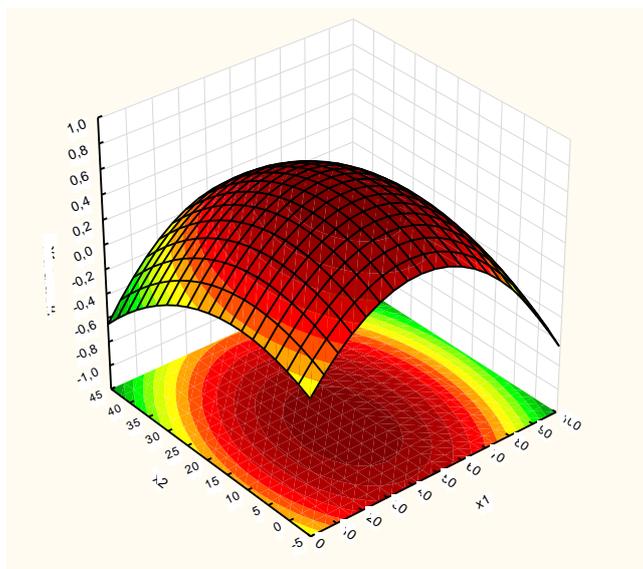


Рис. 1. Графическое отображение регрессионной модели в виде графика желательности

В качестве материала подложки была использована сталь 30Х10Г10 ГОСТ 5632-72, которая широко применяется в гидроприводах машин. Размер подложки составлял 200×200×10 мм. Перед экспериментом подложка была обработана наждачной бумагой для удаления загрязнений.

В рамках исследования были проведены эксперименты по изучению КЭ покрытия и подложки после процесса напыления с использованием ультразвукового кавитационного устройства УТ-4.3Т-22СМ. Частота колебаний составляла 20 кГц, а амплитуда варьировалась от пика к пику и достигала 60 мкм. Эксперименты проводились в 3,5-процентном растворе NaCl. Расстояние между поверхностью образца и кавитационным генератором устанавливается в размере 0,5 миллиметра. Температуру всего испытания контролируют на уровне 23±2°С путём охлаждения циркулирующей воды.

После каждого эксперимента раствор хлорида натрия и три параллельных образца покрытия заменяли, чтобы обеспечить точность данных. Потери массы образцов при исследовании взвешивали на прецизионных весах AND GH-252. Точность весов составляет 0,01 миллиграмма. Взвешивание проводят на разных этапах в течение 1-6 часов.

Затем с помощью 3D-профилометра и сканирующего электронного микроскопа (SEM) наблюдают за морфологией поверхности образцов после эрозии.

Результаты

На рисунке 2 представлена корреляция между кумулятивной потерей массы и временем выдержки в 3,5-процентном растворе хлорида натрия.

Результаты демонстрируют, что совокупная потеря массы подложки и композитного покрытия составила 4,15 и 1,64 миллиграмма соответственно.

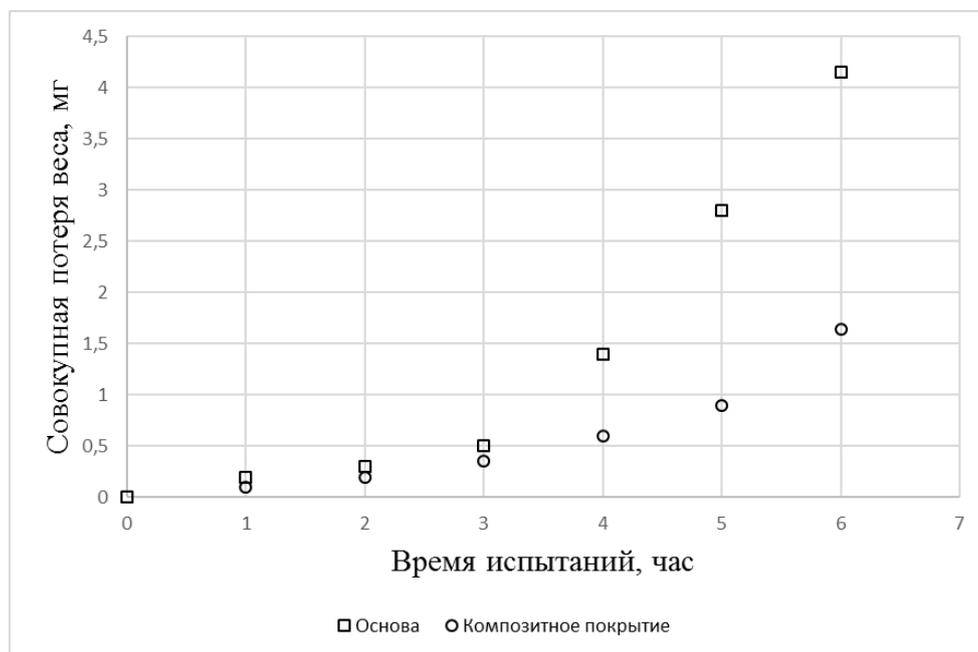


Рис. 2. Совокупная потеря веса подложки и композитного покрытия в зависимости от времени кавитационной эрозии в 3,5 мас.% растворе NaCl

Кроме того, очевидно, что на начальном этапе КЭ происходит инкубационный период материала. На этой стадии кумулятивная потеря массы изменяется медленно, а затем происходит резкое увеличение кумулятивной потери массы. Срок службы подложки в течение одного часа меньше, чем у покрытия в течение трёх часов, что указывает на быстрое разрушение подложки.

Обсуждение

Установлено, что плотности материала подложки 30X10Г10 и композитного покрытия на основе железа, содержащего включения карбида титана, составляют 7,93 и 7,47 г/см³ соответственно.

Результаты вычислений средней скорости эрозии по глубине для подложки и покрытия составляют 8,72 и 3,66 мкм/ч соответственно. Это свидетельствует о том, что композитное покрытие обладает более высокой стойкостью к КЭ по сравнению с материалом подложки 30X10Г10.

Наблюдается явление, заключающееся в том, что при повторном воздействии микроструи и высоких импульсов эрозия преимущественно распространяется в слабых частях, таких как микротрещины, коррозионные ямы и дислокации, что приводит к усталостному

разрушению материала. Эффект закрепления, возникающий в результате осаждения TiC вокруг границы зёрен, позволил избежать дальнейшего расширения разрушения. Кроме пластической деформации матрицы, вокруг некоторых карбидов наблюдаются некоторые углубления. Это связано с тем, что, когда жидкость, взаимодействующая с телом, является коррозионной, процесс КЭ сопровождается электрохимической коррозией. Из-за разницы потенциалов между карбидом и матрицей может возникнуть гальваническая коррозия, которая разъедает матрицу и приводит к образованию углублений. На этом этапе, соответственно, увеличивается и потеря веса композитного покрытия.

Следует подчеркнуть, что устойчивость покрытия и основы к КЭ находится в прямой зависимости от микротвёрдости. Многие исследователи пришли к выводу, что твёрдость является одним из ключевых факторов, определяющих устойчивость к КЭ [14, 15].

Заключение

Анализ поверхностей КЭ показывает, что кавитация воздействует на твёрдую фазу TiC, передавая напряжение на структуру матрицы с высокой ударной вязкостью. Это помогает рассеивать микроструи и силу удара, предотвращая образование и расширение трещин вокруг TiC, а также выкрашивание зёрен этого материала.

Частицы TiC действуют как проскальзывающие дислокации и блокируют трещины, значительно замедляя процессы агрегации и роста микротрещин, а также отслаивания материала покрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Пустошный А.В. Анализ современных исследований по кавитационной эрозии / А.В. Пустошный // Труды Крыловского государственного научного центра. 2021. № 1(395). – С. 13-34. – DOI 10.24937/2542-2324-2021-1-395-13-34.
- [2] Федорова В.С. Сопротивление материалов кавитационной эрозии / В. С. Федорова // Научный Лидер. 2022. № 46(91). – С. 58-61. – EDN JFHBLD.
- [3] Роцин М.Н. Износостойкие металлокерамические покрытия, наплавленные лазером / М. Н. Роцин // Современные проблемы теории машин. 2022. № 14. – С. 7-10. – DOI 10.26160/2307-342X-2022-14-7-10.
- [4] Гойхенберг Ю.Н. Структура, свойства и качество композитного никель-фосфорного покрытия, наносимого на стальные подложки

- различного состава / Ю.Н. Гойхенберг, Д. С. Полухин // Черные металлы. 2022. № 4. – С. 46-49. – DOI 10.17580/chm.2022.04.08.
- [5] Трифонов Г.И. Металломатричное композитное покрытие для восстановления и упрочнения поверхностей деталей плазменным напылением / Г.И. Трифонов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2023. Т. 19, № 5(221). – С. 225-230. – DOI 10.36652/1813-1336-2023-19-5-225-230.
- [6] Прибытков Г.А. Исследование железоматричных композитов с карбидным упрочнением, полученных спеканием механоактивированных смесей титанидов железа с углеродом / Г.А. Прибытков, А.В. Барановский, И.А. Фирсина [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2024. Т. 26, № 2. – С. 212-223. – DOI 10.17212/1994-6309-2024-26.2-212-223.
- [7] Крутский Ю.Л. Карбиды некоторых переходных металлов. свойства, области применения и методы получения. Часть 1. Карбиды титана и ванадия (обзор) / Ю.Л. Крутский, Т.С. Гудыма, И.Д. Кучумова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2022. Т. 65, № 5. – С. 305-322. – DOI 10.17073/0368-0797-2022-5-305-322.
- [8] Новые материалы. Коллектив авторов. Под научной редакцией Ю.С. Карабасова, М.: «МИСИС», 2002. – 736 с.
- [9] Шинкарев А.С. Алюмоматричные композиционные материалы системы Al-C, получаемые аддитивными методами / А. С. Шинкарев, М. А. Бурмистров, С. В. Чернышихин // Перспективное развитие науки, техники и технологий: сборник научных статей 11-ой Международной научно-практической конференции, Курск, 29 октября 2021 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. – С. 289-293. – EDN DHUGIO.
- [10] Ding C, Cui X, Jiao J, Zhu P. Effects of Substrate Preheating Temperatures on the Microstructure, Properties, and Residual Stress of 12CrNi2 Prepared by Laser Cladding Deposition Technique. Materials (Basel). 2018 Nov 28; 11(12):2401. – DOI 10.3390/ma11122401.
- [11] Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский // Издание второе, переработанное и дополненное. М.: Наука, 1976. – 279 с.
- [12] Жачкин С.Ю. Повышение износостойкости композиционного покрытия на основе железа при восстановлении специального оборудования / С.Ю. Жачкин, Г.И. Трифонов, А.В. Пустоветов, П.В. Стрункин // Вестник ВСГУТУ. 2024. № 2(93). – С. 92-99. – DOI 10.53980/24131997_2024_2_92.
- [13] Усманов Р.Р. Методика экспериментальных исследований в агрономии (с расчетами в программах Excel и Straz) / Р.Р. Усманов. – Москва: Российский государственный аграрный университет – МСХА

им. К.А. Тимирязева, 2022. – 81 с. – ISBN 978-5-9675-1889-8. – EDN NYMYES.

- [14] Коваленко В.И. Исследование стойкости к эрозии поверхностных слоев сталей при воздействии кавитации / В.И. Коваленко, Л.И. Мартыненко, В.Г. Маринин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, № 5 (74). 2015. – С. 23-27. – DOI 10.15587/1729-4061.2015.40196.
- [15] Алван Х. Л. А. Повышение кавитационной стойкости поверхностей деталей нанесением защитных покрытий: специальность 25.80.00: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Алван Хуссам Лефта Алван, 2022. – 139 с. – EDN QVLNSQ.

S.Yu. Zhachkin, G.I. Trifonov

TESTING OF AN IRON-BASED COMPOSITE COATING FOR CAVITATION EROSION

Military Training and Research Center of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin», Voronezh, Russia

Abstract

The paper compares cavitation erosion of steel samples of the 30X10G10 grade and samples with a composite coating. The sample size is 200 × 200 × 10 mm. The composite coating was applied by the plasma method from a mixture of two components: a self-fluxing iron-based alloy (fraction 20-63 microns, 88.7%) and a titanium carbide powder (fraction 43-44 microns, 11.3%). Studies have shown that titanium carbide (TiC) particles in the coating act as sliding dislocations, preventing formation and growth of microcracks, as well as peeling of the coating.

Key words: composite coating, plasma spraying, microhardness, cavitation erosion, titanium carbide.

REFERENCES

- [1] Pustoshniy A.V. Analysis of current research on cavitation erosion. Proceedings of the Krylov State Scientific Center. 2021. № 1(395). – P. 13-34. – DOI 10.24937/2542-2324-2021-1-395-13-34.
- [2] Fedorova V.S. Resistance of materials to cavitation erosion. Scientific Leader. 2022. № 46(91). – P. 58-61. – EDN JFHBLD.
- [3] Roshchin M.N. Laser-fused wear-resistant cermet coatings. Modern problems of machine theory. 2022. No. 14. – P. 7-10. – DOI 10.26160/2307-342X-2022-14-7-10.
- [4] Goichenberg Yu.N., Polukhin D.S. Structure, properties and quality of a composite nickel-phosphorus coating applied to steel substrates of various compositions. Ferrous metals. 2022. № 4. – P. 46-49. – DOI 10.17580/chm.2022.04.08.

- [5] Trifonov G.I. Metal matrix composite coating for restoring and strengthening the surfaces of parts by plasma spraying. *Strengthening technologies and coatings*. 2023. T. 19, № 5(221). – P. 225-230. – DOI 10.36652/1813-1336-2023-19-5-225-230.
- [6] Pribytkov G.A., Baranovsky A.B., Firsina I.A [and others] Investigation of iron matrix composites with carbide hardening obtained by sintering mechanically activated mixtures of iron titanides with carbon. *Metal processing (technology, equipment, tools)*. 2024. T. 26, № 2. – P. 212-223. – DOI 10.17212/1994-6309-2024-26.2-212-223.
- [7] Krutsky Yu.L., Gudyma T.S., Kuchumova I.D. Carbides of some transition metals. properties, fields of application, and methods for obtaining information. Part 1. Titanium and vanadium carbides (review) *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Ferrous metallurgy*. 2022. T. 65, № 5. – P. 305-322. – DOI 10.17073/0368-0797-2022-5-305-322.
- [8] New materials. A team of authors. Under the scientific editorship of Yu. S. Karabasova, Moscow: «MISIS», 2002. – 736 p.
- [9] Shinkarev A.S., Burmistrov M.A., Chernyshikhin S.V. Aluminum matrix composite materials of the Al-C system obtained by additive methods. *Perspective development of science, technology and technologies: collection of scientific articles of the 11th International Scientific and Practical Conference, Kursk, October 29, 2021.* – Kursk: South-Western State University, 2021. – P. 289-293. – EDN DHUGIO.
- [10] Ding C, Cui X, Jiao J, Zhu P. Effects of Substrate Preheating Temperatures on the Microstructure, Properties, and Residual Stress of 12CrNi2 Prepared by Laser Cladding Deposition Technique. *Materials (Basel)*. 2018 Nov 28; 11(12):2401. – DOI 10.3390/ma11122401.
- [11] Adler Yu. P., Markova E. V., Granovsky Yu. V. *Planning an experiment while searching for optimal conditions. Second edition, revised and supplemented.* Moscow: Nauka Publ., 1976. – 279 p.
- [12] Zhachkin S.Y., Trifonov G.I., Pustovetov A.V., Strunkin A. V. Improving the wear resistance of composite coatings based on iron during the restoration of special equipment *Vestnik VSGUTU*. 2024. № 2(93). – P. 92-99. – DOI 10.53980/24131997_2024_2_92.
- [13] Usmanov R.R. *Methods of experimental research in agronomy (with calculations in Excel and Straz)*. Moscow: Russian State Agrarian University-Moscow Agricultural Academy. K. A. Timiryazev, 2022. – 81 p. – ISBN 978-5-9675-1889-8. – EDN HYMYES.
- [14] Kovalenko V. I., Martynenko L. I., Marinin V. G. Investigation of the resistance to erosion of surface layers of steels under the influence of cavitation. *East European Journal of Advanced Technologies*, № 5 (74). 2015. – P. 23-27. – DOI 10.15587/1729-4061.2015.40196.
- [15] Alvan X. L. A. Improving the cavitation resistance of the surfaces of parts by applying protective coatings: specialty 25 \ .80.00: dissertation for the degree of Candidate of technical Sciences 2022. – 139 p. – EDN QVLNSQ.