

Коробов Ю.С., Алван Х.Л., Барбоза М., Лежнин Н.В., Соболева Н.Н., Макаров А.В., Девятьяров М.С., Давыдов А.Ю. Сопротивление эрозионно-коррозионному кавитационному воздействию WC-CoCr- и WC-NiCr-покрытий, полученных методом HVAF // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 20–27. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.1.03

Korobov Yu.S., Alwan H.L., Barbosa M., Lezhnin N.V., Soboleva N.N., Makarov A.V., Deviatyarov M.S., Davydov A.Yu. Cavitation erosion-corrosion resistance of WC-CoCr and WC-NiCr HVAF coatings. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 20–27. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.1.03

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 21, № 1, 2019
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2019.1.03

УДК 621.793

**Ю.С. Коробов^{1,2}, Х.Л. Алван¹, М. Барбоза⁵, Н.В. Лежнин², Н.Н. Соболева^{1,3},
А.В. Макаров^{1,2,3}, М.С. Девятьяров⁴, А.Ю. Давыдов¹**

¹ Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ),
Екатеринбург, Россия

² Институт физики металлов Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

³ Институт машиноведения Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

⁴ ООО «Уральский институт сварки – металлургия», Екатеринбург, Россия

⁵ Институт Фраунгофера материалов и лучевых технологий, Дрезден, Германия

**СОПРОТИВЛЕНИЕ ЭРОЗИОННО-КОРРОЗИОННОМУ КАВИТАЦИОННОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ
WC-CoCr- И WC-NiCr-ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ HVAF**

Для нанесения металлокерамических покрытий WC-CoCr и WC-NiCr на стальную основу использовался метод сверхзвукового газозвукового напыления – HVAF. Целью настоящего исследования являлось сравнение значений сопротивления представленных покрытий коррозионно-кавитационному воздействию методом ультразвуковых колебаний в жидкой среде с приложением постоянного напряжения 12 В. Для оценки исходной шероховатости рабочей поверхности образцов из материала подложки и покрытий перед испытанием использовали оптическую 3D-профилометрию. С целью изучения микрорельефа поверхности покрытий после испытания использовали сканирующую электронную микроскопию. Результаты испытаний на кавитационную стойкость покрытия WC-NiCr показали приблизительно на 20 % лучшее сопротивление кавитационному изнашиванию по сравнению с покрытием WC-CoCr в данных условиях. Общие потери массы для WC-NiCr-покрытия достигали 0,66 % от исходной массы образца, в то время как для WC-CoCr-покрытия составили около 0,82 %. Сканирующая электронная микроскопия испытанных образцов показала наличие более выраженного рельефа и относительно крупных пор кавитационного происхождения на поверхности WC-CoCr-покрытия по сравнению с WC-NiCr. Таким образом, метод высокоскоростного термического напыления HVAF может использоваться в качестве эффективного метода нанесения металлокерамических коррозионно-стойких покрытий для защиты деталей из конструкционных материалов, так как позволяет повысить сопротивление кавитационному эрозионно-коррозионному износу. Так, по сравнению с материалом подложки (сталь 40) стойкость к кавитации повысилась в 2,3 и 1,8 раза для WC-NiCr- и WC-CoCr-покрытий соответственно.

Ключевые слова: кавитационное испытание, эрозионно-коррозионное кавитационное воздействие, HVAF, термическое напыление, металлокерамические покрытия, WC-CoCr, WC-NiCr, топография поверхности.

**Yu.S. Korobov^{1,2}, H.L. Alwan¹, M. Barbosa⁵, N.V. Lezhnin², N.N. Soboleva^{1,3},
A.V. Makarov^{1,2,3}, M.S. Deviatyarov⁴, A.Yu. Davydov¹**

¹ Ural Federal University UrFU named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Yekaterinburg, Russian Federation

² Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation

³ Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yekaterinburg, Russian Federation

⁴ Ural Welding Institute-Metallurgy, Yekaterinburg, Russian Federation

⁵ IWS Fraunhofer, Dresden, Germany

**CAVITATION EROSION-CORROSION RESISTANCE OF WC-CoCr
AND WC-NiCr HVAF COATINGS**

The High Velocity Air Fuel (HVAF) thermal spraying process has been used to deposit cermet coatings, represented by WC-CoCr and WC-NiCr, onto a steel 40 substrate. The major objective of this study is to make a comparison between these two coatings to indicate their per-

formance to resist the cavitation erosion-corrosion when tested using ultrasonic vibratory method. Scanning Electron Microscope (SEM) was used to characterize these two coatings. In addition, the profilometry of the substrate and the coated surfaces was conducted to indicate the initial state of the surfaces. The obtained results from the cavitation test showed that the coating by WC–NiCr has exhibited a better performance than that of WC–CoCr coating according to the test conditions. In this regard, total weight loss of WC–NiCr coating reached to 0.66% of the original specimen weight whilst it was about 0.82% for the WC–CoCr coating. SEM micrographs of the eroded surfaces of these three materials, substrate and two coatings, have evidenced that the surface of the WC–CoCr was more damaged than the surface of the WC–NiCr coating. The HVAF thermal spraying process can be effectively used in deposition the two coatings such that improvement of steel 40 up to 2.3 and 1.8 times has been obtained by applying the WC–NiCr and WC–CoCr coatings, respectively.

Keywords: cavitation test, erosion-corrosion cavitation, HVAF process, thermal spraying coating, cermet coatings, WC–CoCr, WC–NiCr, surface topography.

Введение

Кавитация – одна из самых распространенных проблем, оказывающих серьезное влияние на эксплуатацию и живучесть компонентов, работающих в водной среде, таких как гидротурбины, краны, насосы и корабельные винты [1, 2]. Движение твердого тела в потоке жидкости с высокой относительной скоростью приводит к быстрым изменениям давления при температуре окружающей среды, что вызывает формирование микропузырьков в жидкости. Источником разрушения является повторяющееся резкое взрывание пузырьков вблизи поверхности детали. Взрывание пузырьков может вызывать ударные волны и высокоскоростные микроструи жидкости. Таким образом, разрушение может быть результатом как совместного воздействия этих факторов, так и по отдельности. Такое воздействие коллапсирующих пузырей в течение длительного времени способно вызвать износ поверхности материала, что ведет к разрушению материала и оставляет небольшие впадины и полости на поверхности, подвергшейся действию кавитации [3–9].

Для обеспечения эффективной работы деталей и стойкости к условиям эксплуатации необходимо уделять внимание защите поверхности деталей. Применение покрытия позволяет получить высокую твердость на поверхности за счет, например, металлокерамического покрытия при сохранении допустимого уровня вязкости по сечению детали [10]. Термическое напыление – одна из эффективных технологий, широко используемых для создания износостойких, эрозионно- и коррозионно-стойких покрытий в различных отраслях промышленности [11]. Наиболее часто используемыми методами термического напыления твердых покрытий с похожим принципом являются сверхзвуковое газокислородное (HVOF) и сверхзвуковое газозвуковое напыление (HVAF). В последнее время получение покрытий с использованием сжатого воздуха для HVAF вместо чистого кислорода для HVOF позволяет снизить стоимость процесса и содержание кислорода в покрытии [12–14]. А напыление с более низкой температурой пламени и более высокой скоростью частиц порошка позволяет HVAF стать альтернативой методу HVOF [15]. Высокая

скорость напыляемых частиц (≈ 1000 м/с) для HVAF позволяет получить плотные покрытия с низкой пористостью [16, 17]. Существует ряд материалов покрытий, которые могут быть успешно нанесены методом HVAF термического напыления и быть использованы для различного применения.

Этим методом можно эффективно наносить покрытия на железной или никелевой основе, имеющие высокую твердость, хорошую износостойкость и коррозионную стойкость [18–21]. Твердые материалы WC и Cr_3C_2 широко доступны как коммерчески рекомендованный состав порошка для термического нанесения покрытий методом HVAF. Наиболее часто используемые композиции имеют следующие обозначения: WC–12Co, WC–17Co, WC–10Co4Cr, WC–6Co8Cr, WC–20Cr7Ni и Cr_3C_2 –20–25NiCr. Нанесение этих покрытий производится в различных целях, например с целью повышения износостойкости, эрозионной, коррозионной и кавитационной стойкости [12, 17, 22, 23].

В данной работе два вида металлокерамических покрытий (WC–CoCr и WC–NiCr) наносились методом HVAF на основу из стали 40 для сравнения их кавитационной стойкости. Материал WC–CoCr-покрытия соответствовал системе легирования WC–10Co4Cr. Этот состав, в котором добавка хрома улучшает коррозионную и эрозионную стойкость, наиболее часто используется для термического напыления. Кроме того, эти покрытия применяются для повышения износостойкости и кавитационной стойкости в ряде инженерных задач [12, 17, 22, 24]. Что касается второго покрытия, то здесь использовалась композиция WC–20Ni7Cr. Это менее распространенная, чем WC–10Co4Cr, система легирования для покрытий такого вида. Однако она довольно часто используется в виде Cr_3C_2 –NiCr, особенно для повышения износостойкости. Благодаря высокой коррозионной стойкости NiCr она используется для деталей, работающих в коррозионных средах [25, 26]. Для оценки кавитационной стойкости этих двух покрытий, использованных в данной работе, проводились испытания с колебанием образца с ультразвуковой частотой в жидкой среде (вода) с приложением к нему постоянного напряжения. Это позволило создать суммарный эффект механического и электрохимического воздействия, приводящего к существенному

Химический состав материала основы и покрытий (мас. %)

Материал подложки (сталь 40)								
C	Si	Mn	Cu	Co	S	P	Другие	Fe
0,404	0,283	0,60	0,142	0,0074	<0,001	0,0053	≈ 0,17	98,4
Покрытие WC–CoCr								
C	Co	Cr	Fe	W	Другие			
5,34	9,86	4,03	0,08	Основа	<0,3			
Покрытие WC–NiCr								
C	Ni	Cr	Fe	W	Другие			
6,34	6,64	20,82	0,12	Основа	<0,3			

ускорению разрушения по сравнению с действием этих факторов по отдельности. Этот эффект можно назвать эрозионно-коррозионным кавитационным воздействием [27, 28].

Материалы и методы

Два типа порошков на WC-основе, а именно WC–CoCr и WC–NiCr, напыляли на основу из среднеуглеродистой стали методом сверхзвукового газозвукового напыления – HVOF. Дисперсные частицы размером 10–25 мкм использовались для нанесения покрытий толщиной порядка 230 мкм. Химический состав подложки из среднеуглеродистой стали и материалов покрытий WC–CoCr и WC–NiCr представлен в таблице.

Образцы для испытаний были изготовлены в соответствии со стандартом ASTM G32–10¹. На рис. 1 приведены окончательные размеры образца с учетом напыленного слоя.

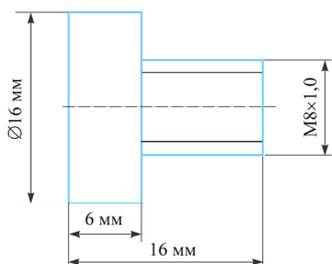


Рис. 1. Внешний вид образца для испытаний на кавитационную стойкость

В качестве критерия сравнения двух материалов покрытий были выбраны потери массы в результате кавитационного воздействия в заданных

условиях. Образцы крепились на свободном конце волновода ультразвукового инструмента. Режимы испытаний на кавитационную стойкость приведены ниже. Вода использовалась в качестве жидкой среды испытаний. Для усиления кавитационного воздействия и создания комбинации механического и электрохимического воздействия к образцу прикладывалось постоянное напряжение. Во время испытания на кавитационную стойкость вода подавалась снизу через сопло диаметром 6 мм, расположенное вертикально на расстоянии 1–3 мм от поверхности образца. На рис. 2 показан принцип работы экспериментальной установки и характер распределения жидкости во время испытания.

Режим испытания на кавитационную стойкость:

- Частота колебаний 20 кГц
- Амплитуда колебаний..... 20 мкм
- Мощность ультразвукового генератора 500 Вт
- Среда испытания вода
- Прикладываемое напряжение 12 В

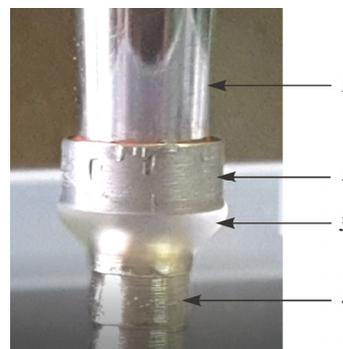


Рис. 2. Принцип работы испытательной установки и характер распределения жидкости в процессе испытания: 1 – волновод; 2 – образец; 3 – струя воды; 4 – сопло для подачи воды

¹ ASTM. Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus, G 32 - 10. 2011. P. 1–19.

Испытуемые образцы шлифуют для получения низкой шероховатости поверхности. Для этих целей использовались шлифовальный круг из кремния для стального образца ст40 и алмазный круг для покрытий. С целью оценки исходного состояния поверхности перед испытаниями на кавитационную стойкость измерялась шероховатость поверхности образцов на оптическом профилометре Wyko NT-1100. Потери массы образцов в результате испытания оценивались с помощью аналитических весов ВЛР-200 с погрешностью 0,5 мг. Общее время испытания на кавитационную стойкость составило 330 мин с разделением на периоды: по 15 мин первые два периода и по 60 мин пять периодов. Перед взвешиванием образцы промывались в ацетоне и сушились горячим воздухом в течение 30 с. Чистка проводилась до и после каждого взвешивания.

Результаты и их обсуждение

Результаты испытаний на кавитационную стойкость среднеуглеродистой стали и WC-CoCr- и WC-NiCr-покрытий приведены на рис. 3. Кривые на рис. 3 показывают типичный характер кавитационного износа. Во время инкубационного периода в течение ~30 мин материал поглощает энергию без значительной потери массы. На следующем участке угол наклона кривых изменяется, его величина определяет темп потери массы.

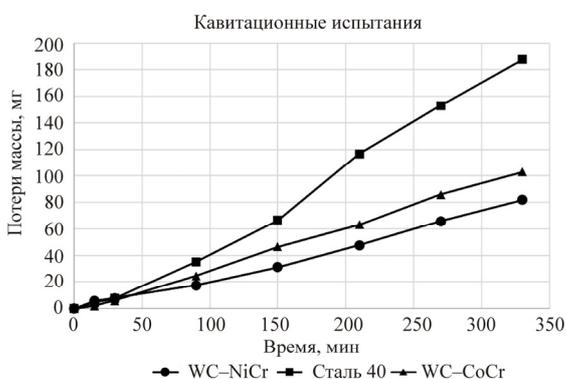


Рис. 3. Потери массы образцов в зависимости от времени кавитационного воздействия

Видно, что оба покрытия показали более высокую кавитационную стойкость по сравнению с основой из среднеуглеродистой стали на базе испытания 330 мин. При этом WC-NiCr-покрытие показало несколько лучший результат по сравнению с WC-CoCr-покрытием в условиях испытаний, использованных в данной работе. Такой результат можно объяснить более высокой твердостью и более высоким содержанием Cr в WC-NiCr-покрытии. Вероятно, это связано со структурно-

фазовым составом сформированных покрытий и будет подробно исследовано в дальнейшем.

Центральная область поверхности покрытий после испытаний на кавитационную стойкость исследовалась с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) как область наибольшего воздействия кавитации. На рис. 4 представлены результаты СЭМ с поверхности образцов без покрытия и обоих покрытий при увеличении 1000 и 3000. На рисунке хорошо видны темные участки кавитационного разрушения на поверхности основного металла и покрытий. На поверхности основы (см. рис. 4, а) наблюдается более плотное расположение очагов кавитационного разрушения по сравнению с покрытиями. С другой стороны, плотность и размер участков кавитационного разрушения на поверхности WC-NiCr-покрытия (см. рис. 4, в) выглядят значительно меньшими по сравнению с поверхностью WC-CoCr-покрытия (см. рис. 4, б).

Межзеренные границы являются местом сосредоточения оксидов, пор и структурных дефектов. Разрушение от внешних воздействий начинается здесь, что приводит к удалению твердых включений карбидов.

Изображения, полученные с помощью СЭМ, показывают различие в характере износа WC-CoCr- и WC-NiCr-покрытий. У WC-CoCr-покрытий видна резкая граница между полостями, являющимися местом размещения частиц WC, и матрицей CoCr. У WC-NiCr-покрытий на указанной границе имеется переходный участок. Его наличие указывает на постепенный характер разрушения (см. рис. 4, д, е). Вероятно, часть хрома перешла в твердый раствор, повысив прочность матрицы.

Информация о состоянии поверхности и шероховатости материала подложки и двух покрытий получена с использованием построения трехмерных профилей на оптическом профилометре до испытаний на кавитационную стойкость. На рис. 5 представлены 3D-профили поверхности образцов материала основы стали 40, WC-CoCr-покрытия и WC-NiCr-покрытия. Помимо химического состава использованных металлокерамических покрытий, также стоит учитывать влияние шероховатости поверхности на развитие разрушения и потери массы образцов в процессе испытания [29, 30]. Для материалов, испытанных в данной работе, среднее квадратичное отклонение профиля поверхности Ra при одинаковом увеличении составило 0,7 мкм для материала основы, 0,65 мкм для WC-CoCr-покрытия и 0,4 мкм для WC-NiCr-покрытия. В связи с этим на полученные результаты испытаний на кавитационную стойкость также может влиять шероховатость поверхности, так как WC-NiCr-покрытие с минимальной шерохова-

тостью поверхности показало лучшее сопротивление кавитации. Аналогичные результаты были показаны в работе N. Espallargas и др. [25], где обнаружено, что полированная поверхность улучшает

эрозионно-коррозионную стойкость термически напыленных покрытий. Таким образом, более низкая шероховатость приводит к меньшим потерям массы.

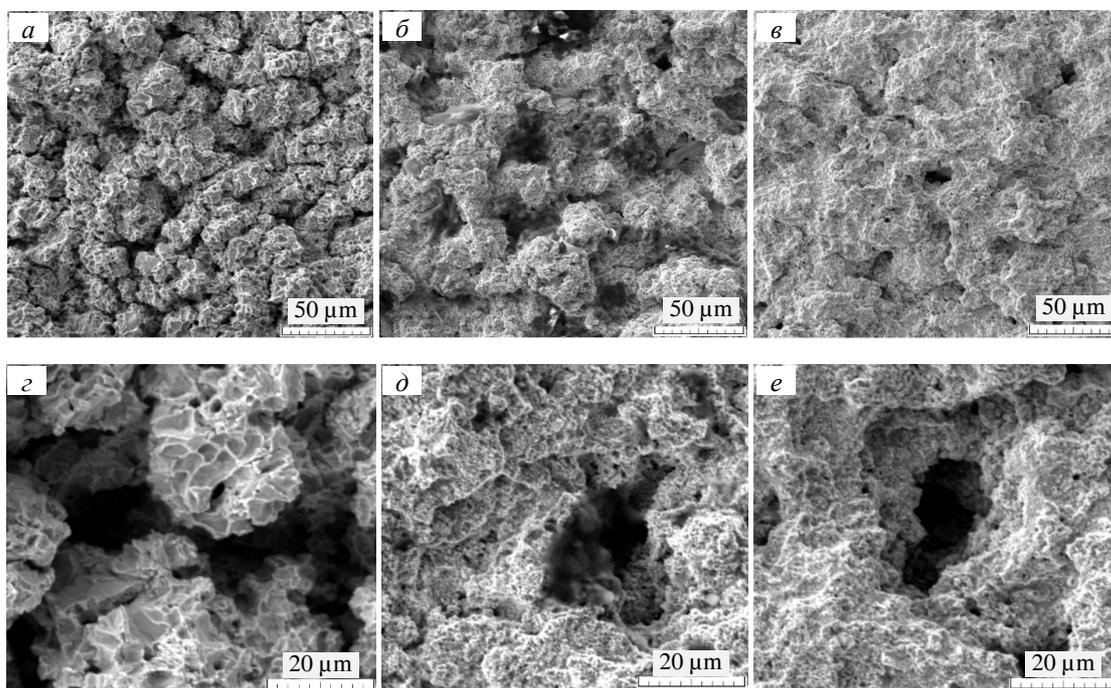


Рис. 4. SEM-изображения поверхности стали 40 (а, г), WC-CoCr-покрытия (б, д) и WC-NiCr-покрытия (в, е) при увеличении 1000 и 3000

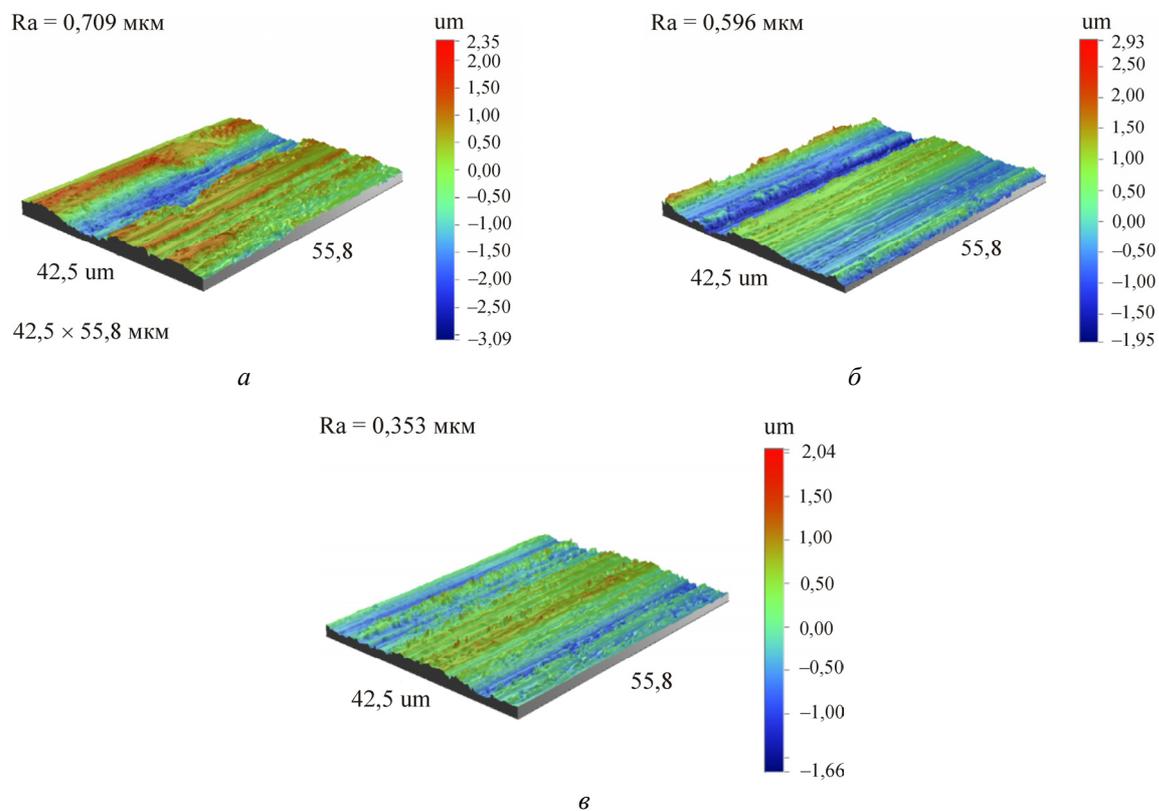


Рис. 5. 3D-профили и значения шероховатости поверхности образцов до испытания: а – сталь 40; б – WC-CoCr- и в – WC-NiCr-покрытия

Выводы

Проведены сравнительные испытания на эрозионно-коррозионную стойкость в условиях кавитационного воздействия металлокерамических покрытий на основе WC–CoCr и WC–NiCr, нанесенных методом сверхзвукового газозвукового напыления на подложку из стали 40. На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

– оба покрытия показали более высокое сопротивление кавитации по сравнению со сталью 40 в течение всего времени испытания (330 мин). Общие потери массы образцов с покрытиями WC–NiCr и WC–CoCr относительно исходной массы образца составили 0,66 и 0,82 % соответственно;

– методом SEM показано, что WC–NiCr-покрытие в результате испытания имеет меньшую плотность и размер очагов кавитационного разрушения по сравнению с WC–CoCr-покрытием. Таким образом, WC–NiCr-покрытие показало лучшую эрозионно-коррозионную стойкость по сравнению с WC–CoCr-покрытием;

– наиболее вероятной причиной повышенной кавитационной стойкости WC–NiCr-покрытия по сравнению с WC–CoCr-покрытием является большая прочность NiCr-матрицы, что улучшает закрепление в ней частиц WC, обеспечивающих сопротивление внешнему кавитационному воздействию;

– сверхзвуковое газозвуковое напыление является эффективным способом нанесения WC–NiCr- и WC–CoCr-покрытий. Это приводит к улучшению стали 40 в 2,3 и 1,8 раза путем нанесения покрытий WC–NiCr и WC–CoCr соответственно.

Настоящее исследование было поддержано Фондом содействия инновациям, программа «Развитие – НТИ 2017» (проект № 0035960).

Список литературы

1. Blake J.R., Taib B.B., Doherty G. Transient cavities near boundaries. P. 2. Free Surface // J. Fluid Mech. – 1987. – Vol. 170. – P. 479–497.
2. Cavitation erosion of martensitic and austenitic stainless steel welded coatings / J.F. Santa, J.A. Blanco, J.E. Giraldo, A. Toro // Wear. – 2011. – Vol. 271. – P. 1445–1453.
3. Kekes D., Psyllaki P., Vardavoulias M. Tribology in Industry wear micro-mechanisms of composite WC–Co / Cr–NiCrFeBSiC coatings. P. I. Dry sliding // Tribol. Ind. – 2014. – Vol. 36, no. 4. – P. 375–383.
4. Slurry and cavitation erosion resistance of thermal spray coatings / J.F. Santa, L.A. Espitia, J.A. Blanco, S.A. Romo, A. Toro // Wear. – 2009. – Vol. 267. – P. 160–167.
5. Hickling R., Plesset M.S. Collapse and rebound of a spherical bubble in water // Phys. Fluids. – 1964. – Vol. 7, no. 1. – P. 7–14.
6. Fujikawa S., Akamatsu T. Effects of the non-equilibrium condensation of vapour on the pressure wave

produced by the collapse of a bubble in a liquid // J. Fluid Mech. – 1980. – Vol. 97, no. 3. – P. 481–512.

7. Naudé C.F., Ellis A.T. On the mechanism of cavitation damage by nonhemispherical cavities collapsing in contact with a solid boundary // Trans. ASME. J. Basic Eng. – 1961. – Vol. 83. – P. 648–656.

8. Vogel A., Lauterborn W., Timm R. Optical and acoustic investigations of the dynamics of laser-produced cavitation bubbles near a solid boundary // J. Fluid Mech. – 1989. – Vol. 206. – P. 299–338.

9. Pereira F., Avellan F., Dupont P. Prediction of cavitation erosion: an energy approach // J. Fluids Eng. – 1998. – Vol. 120. – P. 719–727.

10. Gawne D.T. Surface engineering: advances materials for industrial applications // J. Metall. Mater. – 1993. – Vol. 13, no. 1. – P. 5–15.

11. Chatha S.S., Sidhu H.S., Sidhu B.S. Characterisation and corrosion-erosion behaviour of carbide based thermal spray coatings // J. Miner. Mater. Charact. Eng. – 2012. – Vol. 11, no. 6. – P. 569–586.

12. Wear and corrosion performance of WC–10Co4Cr coatings deposited by different HVOF and HVAF spraying processes / Q. Wang, S. Zhang, Y. Cheng, J. Xiang, X. Zhao, G. Yang // Surf. Coatings Technol. – 2013. – Vol. 218. – P. 127–136.

13. Effect of spraying parameters on the microstructural and corrosion properties of HVAF-sprayed Fe–Cr–Ni–B–C coatings / A. Milanti, V. Matikainen, H. Koivuluoto, G. Bolelli, L. Lusvarghi, P. Vuoristo // Surf. Coatings Technol. – 2015. – Vol. 277. – P. 81–90.

14. Study of structure and corrosion resistance of Fe-based amorphous coatings prepared by HVAF and HVOF / R.Q. Guo, C. Zhang, Q. Chen, Y. Yang, N. Li, L. Liu // Corros. Sci. – 2011. – Vol. 53. – P. 2351–2356.

15. Tribology of HVOF- and HVAF-sprayed WC–10Co4Cr hardmetal coatings: A comparative assessment / G. Bolelli [et al.] // Surf. Coatings Technol. – 2015. – Vol. 265. – P. 125–144.

16. Wear properties of CrC–37WC–18M coatings deposited by HVOF and HVAF spraying processes / I. Hulka, V.A. Şerban, I. Secoşan, P. Vuoristo, K. Niemi // Surf. Coatings Technol. – 2012. – Vol. 210. – P. 15–20.

17. Effect of spray particle velocity on cavitation erosion resistance characteristics of HVOF and HVAF processed 86WC–10Co4Cr hydro turbine coatings / R.K. Kumar, M. Kamaraj, S. Seetharamu, T. Pramod, P. Sampathkumaran // J. Therm. Spray Technol. – 2016. – Vol. 25, no. 6. – P. 1217–1230.

18. Sadeghimeresht E., Markocsan N., Nylén P. A comparative study of corrosion resistance for HVAF-sprayed Fe- and Co-based coatings // Coatings. – 2016. – Vol. 6, no. 16. – P. 1–15.

19. Korobov Yu.S. Comparative analysis of supersonic gas-flame methods of coating application // Metallurgist. – 2006. – Vol. 50, no. 3–4. – P. 158–162.

20. Milanti A., Koivuluoto H., Vuoristo P. Influence of the spray gun type on microstructure and properties of HVAF sprayed Fe-based corrosion resistant coatings // J. Therm. Spray Technol. – 2015. – Vol. 24, no. 7. – P. 1312–1322.

21. Deposition of HVAF-sprayed Ni-based amorphous metallic coatings / A.P. Wang, Z.M. Wang, J. Zhang,

J.Q. Wang // *J. Alloys Compd.* – 2007. – Vol. 440. – P. 225–228.

22. Wang Q., Tang Z., Cha L. Cavitation and sand slurry erosion resistances of WC–10Co–4Cr coatings // *J. Mater. Eng. Perform.* – 2015. – Vol. 24, no. 6. – P. 2435–2443.

23. Microstructure and properties of WC–10%Co–4%Cr spray powders and coatings. P. 1. Powder Characterization / L. Berger, P. Ettmayer, P. Vuoristo, T. Mäntylä, W. Kunert. – 2001. – Vol. 10, no. 2. – P. 311–325.

24. Wear and corrosion behavior of HVOF-sprayed WC–CoCr coatings on Al alloys / M. Barletta, G. Bolelli, B. Bonferroni, L. Lusvarghi // *J. Therm. Spray Technol.* – 2010. – Vol. 19, no. 1–2. – P. 358–367.

25. Cr₃C₂–NiCr and WC–Ni thermal spray coatings as alternatives to hard chromium for erosion-corrosion resistance / N. Espallargas, J. Berget, J.M. Guilemany, A.V. Benedetti, P.H. Suegama // *Surf. Coatings Technol.* – 2008. – Vol. 202, no. 8. – P. 1405–1417.

26. Tribological and corrosion behavior of HVOF sprayed WC–Co, NiCrBSi and Cr₃C₂–NiCr coatings and analysis using design of experiments / Shabana, M.M.M. Sarcar, K.N.S. Suman, S. Kamaluddin // *Mater. Today Proc.* – 2015. – vol. 2, no. 4–5. – P. 2654–2665.

27. Vyas B., Hansson I.L.H. The cavitation erosion-corrosion of stainless // *Corros. Sci.* – 1990. – vol. 30, no. 8/9. – P. 761–770.

28. Zheng Y., Luo S., Ke W. Effect of passivity on electrochemical corrosion behavior of alloys during cavitation in aqueous solutions // *Wear.* – 2007. – Vol. 262, no. 11–12. – P. 1308–1314.

29. Espitia L.A., Toro A. Cavitation resistance, microstructure and surface topography of materials used for hydraulic components // *Tribol. Int.* – 2010. – Vol. 43, no. 11. – P. 2037–2045.

30. Chiu K.Y., Cheng F.T., Man H.C. Evolution of surface roughness of some metallic materials in cavitation erosion // *Ultrasonics.* – 2005. – Vol. 43, no. 9. – P. 713–716.

References

1. Blake J.R., Taib B.B., Doherty G. Transient cavities near boundaries. P. 2. Free Surface. *Journal Fluid Mechanics*, 1987, vol. 170, pp. 479–497.

2. Santa J.F., Blanco J.A., Giraldo J.E., Toro A. Cavitation erosion of martensitic and austenitic stainless steel welded coatings. *Wear*, 2011, vol. 271, pp. 1445–1453.

3. Kekes D., Psyllaki P., Vardavoulias M. Tribology in Industry wear micro-mechanisms of composite WC–Co / Cr–NiCrFeBSiC coatings. P. I. Dry sliding. *Tribology in Industry*, 2014, vol. 36, no. 4, pp. 375–383.

4. Santa J.F., Espitia L.A., Blanco J.A., Romo S.A., Toro A. Slurry and cavitation erosion resistance of thermal spray coatings. *Wear*, 2009, vol. 267, pp. 160–167.

5. Hickling R., Plesset M.S. Collapse and rebound of a spherical bubble in water. *Physics of Fluids*, 1964, vol. 7, no. 1, pp. 7–14.

6. Fujikawa S., Akamatsu T. Effects of the non-equilibrium condensation of vapour on the pressure wave produced by the collapse of a bubble in a liquid. *Journal Fluid Mechanics*, 1980, vol. 97, no. 3, pp. 481–512.

7. Naudé C.F., Ellis A.T. On the mechanism of cavitation damage by nonhemispherical cavities collapsing in contact with a solid boundary. *Trans. ASME. Journal of Basic Engineering*, 1961, vol. 83, pp. 648–656.

8. Vogel A., Lauterborn W., Timm R. Optical and acoustic investigations of the dynamics of laser-produced cavitation bubbles near a solid boundary. *Journal Fluid Mechanics*, 1989, vol. 206, pp. 299–338.

9. Pereira F., Avellan F., Dupont P. Prediction of cavitation erosion: an energy approach. *Journal of Fluids Engineering*, 1998, vol. 120, pp. 719–727.

10. Gawne D.T. Surface engineering: advances materials for industrial applications. *Journal Metall. Mater.*, 1993, vol. 13, no. 1, pp. 5–15.

11. Chatha S.S., Sidhu H.S., Sidhu B.S. Characterisation and corrosion-erosion behaviour of carbide based thermal spray coatings. *Journal Miner. Mater. Charact. Eng.*, 2012, vol. 11, no. 6, pp. 569–586.

12. Wang Q., Zhang S., Cheng Y., Xiang J., Zhao X., Yang G. Wear and corrosion performance of WC–10Co4Cr coatings deposited by different HVOF and HVAF spraying processes. *Surface and Coatings Technology*, 2013, vol. 218, pp. 127–136.

13. Milanti A., Matikainen V., Koivuluoto H., Bolelli G., Lusvarghi L., Vuoristo P. Effect of spraying parameters on the microstructural and corrosion properties of HVAF-sprayed Fe–Cr–Ni–B–C coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2015, vol. 277, pp. 81–90.

14. Guo R.Q., Zhang C., Chen Q., Yang Y., Li N., Liu L. Study of structure and corrosion resistance of Fe-based amorphous coatings prepared by HVAF and HVOF. *Corrosion Science*, 2011, vol. 53, pp. 2351–2356.

15. Bolelli G. et al. Tribology of HVOF- and HVAF-sprayed WC–10Co4Cr hardmetal coatings: A comparative assessment. *Surface Coatings Technology*, 2015, vol. 265, pp. 125–144.

16. Hulka I., Şerban V.A., Secoşan I., Vuoristo P., Niemi K. Wear properties of CrC–37WC–18M coatings deposited by HVOF and HVAF spraying processes. *Surface Coatings Technology*, 2012, vol. 210, pp. 15–20.

17. Kumar R.K., Kamaraj M., Seetharamu S., Pramod T., Sampathkumaran P. Effect of spray particle velocity on cavitation erosion resistance characteristics of HVOF and HVAF processed 86WC–10Co4Cr hydro turbine coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2016, vol. 25, no. 6, pp. 1217–1230.

18. Sadeghimeresht E., Markocsan N., Nylén P. A comparative study of corrosion resistance for HVAF-sprayed Fe- and Co-based coatings. *Coatings*, 2016, vol. 6, no. 16, pp. 1–15.

19. Korobov Yu.S. Comparative analysis of supersonic gas-flame methods of coating application. *Metallurgist*, 2006, vol. 50, no. 3–4, pp. 158–162.

20. Milanti A., Koivuluoto H., Vuoristo P. Influence of the spray gun type on microstructure and properties of HVAF sprayed Fe-based corrosion resistant coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2015, vol. 24, no. 7, pp. 1312–1322.

21. Wang A.P., Wang Z.M., Zhang J., Wang J.Q. Deposition of HVAF-sprayed Ni-based amorphous metallic coatings. *Journal Alloys and Compounds*, 2007. vol. 440, pp. 225–228.

22. Wang Q., Tang Z., Cha L. Cavitation and sand slurry erosion resistances of WC–10Co–4Cr coatings. *Journal of Materials Engineering Performance*, 2015, vol. 24, no. 6, pp. 2435–2443.

23. Berger L., Ettmayer P., Vuoristo P., Mäntylä T., Kunert W. Microstructure and properties of WC–10%Co–4%Cr spray powders and coatings. *P. 1. Powder Characterization*, 2001, vol. 10, no. 2, pp. 311–325.

24. Barletta M., Bolelli G., Bonferroni B., Lusvarghi L. Wear and corrosion behavior of HVOF-sprayed WC–CoCr coatings on Al alloys. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2010, vol. 19, no. 1–2, pp. 358–367.

25. Espallargas N., Berget J., Guilemany J.M., Benedetti A.V., Suegama P.H. Cr₃C₂–NiCr and WC–Ni thermal spray coatings as alternatives to hard chromium for erosion-corrosion resistance. *Surface Coatings Technology*, 2008, vol. 202, no. 8, pp. 1405–1417.

26. Shabana, Sarcar M.M.M., Suman K.N.S., Kamaluddin S. Tribological and corrosion behavior of HVOF sprayed WC–Co, NiCrBSi and Cr₃C₂–NiCr coatings and analysis using design of experiments. *Materials Today: Proceedings*, 2015, vol. 2, no. 4–5, pp. 2654–2665.

27. Vyas B., Hansson I.L.H. The cavitation erosion-corrosion of stainless. *Corrosion Science*, 1990, vol. 30, no. 8/9, pp. 761–770.

28. Zheng Y., Luo S., Ke W. Effect of passivity on electrochemical corrosion behavior of alloys during cavitation in aqueous solutions. *Wear.*, 2007., vol. 262, no. 11–12, pp. 1308–1314.

29. Espitia L.A., Toro A. Cavitation resistance, microstructure and surface topography of materials used for hydraulic components. *Tribology International*, 2010, vol. 43, no. 11, pp. 2037–2045.

30. Chiu K.Y., Cheng F.T., Man H.C. Evolution of surface roughness of some metallic materials in cavitation erosion. *Ultrasonics.*, 2005, vol. 43, no. 9, pp. 713–716.

Получено 17.11.18

Опубликовано 21.03.19

Сведения об авторах

Коробов Юрий Станиславович (Екатеринбург, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры технологии сварочного производства Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: yukorobov@gmail.com.

Алван Хуссам Лейфа (Багдад, Ирак / Екатеринбург, Россия) – аспирант кафедры технологии сварочного производства Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: lefta.hussam@gmail.com.

Лежнин Никита Владимирович (Екатеринбург, Россия) – старший научный сотрудник лаборатории механических свойств Института физики металлов Уральского отделения РАН; e-mail: lezhnin@imp.uran.ru.

Соболева Наталья Николаевна (Екатеринбург, Россия) – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории конструкционного материаловедения Института машиноведения Уральского отделения РАН, старший преподаватель кафедры технологии сварочного производства Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: natashasoboleva@list.ru.

Макаров Алексей Викторович (Екатеринбург, Россия) – доктор технических наук, заведующий отделом материаловедения и лабораторией механических свойств Института физики металлов Уральского отделения РАН, главный научный сотрудник лаборатории конструкционного материаловедения Института машиноведения Уральского отделения РАН, профессор кафедры технологии сварочного производства Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, e-mail: av-mak@yandex.ru.

Девятьяров Михаил Сергеевич (Екатеринбург, Россия) – инженер, директор ООО «Уральский институт сварки – металлургия»; e-mail: dms@mashprom.ru.

Давыдов Александр Юрьевич (Екатеринбург, Россия) – бакалавр, лаборант кафедры технологии сварочного производства Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: yargrg@gmail.com.

About the authors

Yury S. Korobov (Yekaterinburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Welding Technology and Production, Ural Federal University UrFU named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; e-mail: yukorobov@gmail.com.

Hussam L. Alwan (Baghdad, Iraq / Yekaterinburg, Russian Federation) – Graduate Student, Department of Welding Technology and Production, Ural Federal University UrFU named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; e-mail: lefta.hussam@gmail.com.

Nikita V. Lezhnin (Yekaterinburg, Russian Federation) – Senior Researcher Scientist, Laboratory of Mechanical Properties, Institute of Metal Physics of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: lezhnin@imp.uran.ru.

Natalia N. Soboleva (Yekaterinburg, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Researcher Scientist, Laboratory of Material Structure, Institute of Engineering Science of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Senior Lecturer, Department of Welding Technology and Production, Ural Federal University UrFU named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; e-mail: natashasoboleva@list.ru.

Aleksey V. Makarov (Yekaterinburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Head of Materials Science and Mechanical Properties Laboratory, Institute of Metal Physics of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher Scientist, Laboratory of Material Structure, Institute of Engineering Science of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Professor, Department of Welding Technology and Production, Ural Federal University UrFU named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; e-mail: av-mak@yandex.ru.

Michael S. Deviatyarov (Yekaterinburg, Russian Federation) – Engineer, the Manager of Ural Welding Institute-Metallurgy; e-mail: dms@mashprom.ru.

Alexander Yu. Davydov (Yekaterinburg, Russian Federation) – Laboratory Assistant, Department of Welding Technology and Production, Ural Federal University UrFU named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; e-mail: yargrg@gmail.com.