

УДК 621.791.92 + 532.528

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2021-3-62-70

Применение разработанной методики оценки кавитационного воздействия для анализа эрозионной стойкости металлокерамических газотермических покрытий

© 2021 г. **Х.Л. Алван**¹, **А.В. Макаров**², **Н.Н. Соболева**^{1,3}, **Ю.С. Коробов**², **В.И. Шумяков**¹,
Н.В. Лежнин², **В.А. Завалишин**²

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

² Институт физики металлов имени М.Н. Михеева (ИФМ) УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

³ Институт машиноведения (ИМАШ) УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Статья поступила в редакцию 09.06.21 г., доработана 29.06.21 г., подписана в печать 02.07.21 г.

Аннотация: Многие детали машин, работающие в контакте с быстротекущим потоком жидкостей (например, лопасти турбины гидростанций, клапаны, лопасти крыльчатки насосов, корабельные винты, системы охлаждения различных агрегатов и т.п.), подвергаются одному из видов износа – кавитационной эрозии. Исключение или уменьшение кавитационной эрозии является важной задачей, так как позволяет достичь большого экономического эффекта. В данном исследовании предложена разработанная и запатентованная методика для оценки стойкости металлокерамических газотермических покрытий (WC–10Co4Cr и WC–20CrC–7Ni) против кавитационной эрозии. Для получения металлокерамических покрытий использовался метод сверхзвукового газозвукового напыления. Цель работы состояла в испытании новой методики оценки стойкости покрытий против кавитационного воздействия, которая отличается от стандартного метода расположением испытываемого образца относительно жидкости, используемой при испытании. Кроме того, проведен анализ структуры полученных покрытий в исходном состоянии перед испытаниями и изучено их поведение после кавитационного воздействия с применением растровой электронной микроскопии. Критерий потери объема материала в процессе кавитационного воздействия был использован для оценки стойкости покрытий. Результаты проведенных испытаний показали, что покрытие WC–20CrC–7Ni имеет несколько более высокую кавитационную стойкость по сравнению с составом WC–10Co4Cr, несмотря на его немного меньшую среднюю твердость (850±90 HV_{0,5} против 950±60 HV_{0,5}). Исследование поверхности и поперечных сечений покрытий показало, что они характеризуются разными механизмами эрозионного разрушения. Можно сделать вывод, что наличие дефектов (пор) в структуре покрытий является основной причиной, способствующей снижению их стойкости против кавитационной эрозии. Таким образом, разработанная методика доказала свою эффективность при получении экспериментальных данных для анализа кавитационного износа металлокерамических газотермических покрытий.

Ключевые слова: кавитационная эрозия, ультразвуковое кавитационное испытание, WC–10Co4Cr, WC–20CrC–7Ni, металлокерамические покрытия, микроструктура, термическое напыление.

Алван Х.Л. – аспирант кафедры технологии сварочного производства УрФУ (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19). E-mail: lefta.hussam@gmail.com.

Макаров А.В. – чл.-кор. РАН, докт. техн. наук, зав. отделом материаловедения и лабораторией механических свойств ИФМ УрО РАН (620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18). E-mail: av-mak@yandex.ru.

Соболева Н.Н. – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник лаборатории конструкционного материаловедения ИМАШ УрО РАН (620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34), доцент кафедры технологии сварочного производства УрФУ. E-mail: natashasoboleva@list.ru.

Коробов Ю.С. – докт. техн. наук, гл. науч. сотрудник, зав. лабораторией лазерной и плазменной обработки ИФМ УрО РАН. E-mail: yukorobov@gmail.com.

Шумяков В.И. – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии сварочного производства УрФУ. E-mail: val29071@yandex.ru.

Лежнин Н.В. – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник ИФМ УрО РАН. E-mail: nlezhnin@bk.ru.

Завалишин В.А. – канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник ИФМ УрО РАН. E-mail: zavalii@imp.uran.ru.

Для цитирования: Алван Х.Л., Макаров А.В., Соболева Н.Н., Коробов Ю.С., Шумяков В.И., Лежнин Н.В., Завалишин В.А. Применение разработанной методики оценки кавитационного воздействия для анализа эрозионной стойкости металлокерамических газотермических покрытий. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2021. Т. 15. № 3. С. 62–70. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2021-3-62-70.

Using the developed cavitation test to evaluate erosion resistance of cermet thermal sprayed coatings

H.L. Alwan¹, A.V. Makarov², N.N. Soboleva^{1,3}, Yu.S. Korobov², V.I. Shumyakov¹,
N.V. Lezhnin², V.A. Zavalishin²

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

² M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

³ Institute of Engineering Science of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

Received 09.06.2021, revised 29.06.2021, accepted for publication 02.07.2021

Abstract: Many machinery parts working in contact with a fast-flowing fluid flow (e.g. turbine blades of hydroelectric power plants, valves, pump impeller blades, ship propellers, cooling systems for various units, etc.) are subjected to such type of wear as cavitation erosion. An important objective is to eliminate or reduce cavitation erosion so as to achieve a considerable economic effect. This research uses a patented technique developed to evaluate the cavitation erosion resistance of cermet thermal spray coatings (WC–10Co4Cr and WC–20CrC–7Ni). These coatings were prepared using high velocity air fuel thermal spraying (HVOF). The aim of this study is to test a new technique for evaluating coating cavitation resistance, which differs from the standard one by specimen positioning relative to the testing liquid. In addition, scanning electron microscopy (SEM) was used to analyze the initial structure of the coatings prepared and study their behavior after cavitation exposure. The material volume loss criterion during the cavitation test was used to evaluate the coating resistance. The results of cavitation tests showed that the WC–20CrC–7Ni coating has a somewhat higher cavitation resistance than that of WC–10Co4Cr despite its slightly lower average hardness (850 ± 90 HV_{0.5} versus 950 ± 60 HV_{0.5}). The study of coating surfaces and cross-sections showed that they feature by different erosion mechanisms. It can be concluded that the presence of defects (pores) in the coating structure is the main reason for reducing their cavitation erosion resistance. Therefore, the developed technique proved effective in obtaining experimental data to analyze cermet thermal spray coatings for cavitation wear.

Keywords: cavitation erosion, ultrasonic cavitation test, WC–10Co4Cr, WC–20CrC–7Ni, cermet coatings, microstructure, thermal spraying.

Alwan H.L. – Postgraduate student, Welding technology department, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU) (620002, Russia, Ekaterinburg, Mira str., 19). E-mail: lefta.hussam@gmail.com.

Makarov A.V. – Dr. Sci. (Eng.), Corresponding member of Russian Academy of Sciences (RAS), Principal research scientist, Head of Materials science department, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of RAS (IMP UB RAS) (620108, Russia, Ekaterinburg, S. Kovalevskaya str., 18). E-mail: av-mak@yandex.ru.

Soboleva N.N. – Cand. Sci. (Eng.), Senior research scientist, Laboratory of constructional material science, Institute of Engineering Science of the Ural Branch of RAS (620049, Russia, Ekaterinburg, Komsomolskaya str., 34); Assistant prof., Welding technology department, UrFU. E-mail: natashasoboleva@list.ru.

Korobov Yu.S. – Dr. Sci. (Eng.), Principal research scientist, Head of Laser/plasma treatment laboratory, IMP UB RAS. E-mail: yukorobov@gmail.com.

Shumyakov V.I. – Cand. Sci. (Eng.), Assistant prof., Welding technology department, UrFU. E-mail: val29071@yandex.ru.

Lezhnin N.V. – Cand. Sci. (Eng.), Senior research scientist, Mechanical properties laboratory, IMP UB RAS. E-mail: nlezhnin@bk.ru.

Zavalishin V.A. – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading research scientist, IMP UB RAS. E-mail: zavali@imp.uran.ru.

For citation: Alwan H.L., Makarov A.V., Soboleva N.N., Korobov Yu.S., Shumyakov V.I., Lezhnin N.V., Zavalishin V.A. Using the developed cavitation test to evaluate erosion resistance of cermet thermal sprayed coatings. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya (Powder Metallurgy and Functional Coatings)*. 2021. Vol. 15. No. 3. P. 62–70 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2021-3-62-70.

Введение

Детали машин, работающие в контакте с быстротекущим потоком жидкостей (например, лопасти турбины гидростанций, лопасти насосов, системы охлаждения различных агрегатов и т.п.), подвергаются одному из видов износа — кавита-

ционной эрозии, которая существенно влияет на эффективность оборудования [1, 2]. Поэтому ее исключение или уменьшение является важной задачей, так как позволяет достичь большого экономического эффекта. Кавитационный износ воз-

никает в результате схлопывания кавитационного пузыря в жидкости с образованием микроструй со скоростью выше 120 м/с [3–5], при этом ударное давление может превышать 1500 МПа [6, 7].

Разрушение металлических деталей машин во многих случаях начинается с поверхностных слоев, что снижает их работоспособность и надежность. Одним из наиболее действенных путей решения этой проблемы является нанесение на поверхности металлических деталей защитных высокопрочных, кавитационно- и коррозионно-стойких покрытий [8–12]. Однако эффективность повышения стойкости покрытий против кавитационного износа может существенно зависеть от материалов для получения покрытий и условий, в которых они используются, а также способов их нанесения. Применение сверхзвукового газозвукового напыления, распыляющего частицы с высокой скоростью (до 1000 м/с), позволяет формировать плотные покрытия высокого качества со сниженным содержанием оксидов [13, 14].

Металлокерамические материалы (керметы) широко востребованы при термическом напылении для получения защитных покрытий с высоким уровнем твердости. Они могут использоваться в широком спектре промышленных применений, требующих стойкости к кавитационно-эрозионным повреждениям [15, 16]. Керметные покрытия обычно состоят из комбинации твердых материалов, например WC и Cr_3C_2 , с одним или несколькими пластичными металлами матрицы, например Co или Ni [17–19]. Дополнительное легирование матрицы хромом (покрытия составов WC—CoCr, WC—CrCNi [17, 20, 21] и Cr_3C_2 —NiCr [22]) может повысить коррозионную стойкость и уменьшить кавитационную эрозию этих покрытий. Наличие дефектов (пор) в их структуре существенно снижает кавитационную стойкость [23].

Авторами [24] была разработана оригинальная методика оценки кавитационной стойкости, позволяющая получать более стабильные результаты при сокращении времени испытаний в сравнении с существующими аналогами [25].

Целью данного исследования являлся сравнительный анализ особенностей эрозионного разрушения двух металлокерамических газотермических покрытий (составов, мас. %: WC—10Co4Cr и WC—20CrC—7Ni) с использованием новой разработанной методики кавитационных испытаний.

Методика исследования

Образцы с покрытиями (рис. 1) были подготовлены в соответствии со стандартом ASTM G32-10 [25] путем сверхзвукового газозвукового напыления с использованием установки SB9500-gun («Uniquescoat Technologies», США). Основой служила конструкционная сталь 40, в качестве распыляемых материалов — агломерированные и спеченные порошки TAS WC-340 (WC—10Co4Cr, далее — WC—CoCr) и TAS WC-390 (WC—20CrC—7Ni, далее — WC—CrC—Ni) производства «C&M Technologies GmbH» (Германия) с размером частиц 10–25 мкм. Их химический состав следующий, мас. %:

WC—CoCr: 5,34 C, 9,91 Co, 3,94 Cr, 0,07 Fe, остальное — W;

WC—CrC—Ni: 6,24 C, 21,30 Cr, 7,02 Ni, 0,09 Fe, остальное — W.

Изучение морфологии порошков с применением растрового электронного микроскопа (РЭМ) VEGA II XMU («Tescan», Чехия) показало (рис. 2), что частицы имеют сферическую форму, а их поверхность — шероховатость и некоторую пористость.

Микротвердость покрытий по Виккерсу определяли на микротвердомере HNV-G21DT («Shimadzu», Япония) при нагрузке на индентор 4,9 Н по результатам 10 измерений с доверительной вероятностью 0,95. Измерения проводили в центральной части поперечного сечения шлифованного покрытия перед кавитационными испытаниями.

Для анализа эрозионной стойкости в качестве метода оценки стойкости материалов против кавитации выбран ультразвуковой вибрационный способ, разработанный авторами [24]. Испытания осуществляли в водопроводной воде (pH = 7,5) с применением ультразвукового генератора мощностью 500 Вт при частоте колебаний $20 \pm 0,1$ кГц и амплитуде 55 ± 3 мкм. Для ускорения испытаний использовали анодную поляризацию путем подачи напряжения 8,5 В к образцу. Общее время экспериментов составило 330 мин. Износ оценивали по потере объема образцов в процессе кавитационного воздействия. На рис. 3 представлен принцип работы по схеме с наложением электрического напряжения и со струей жидкости, подаваемой снизу на рабочую поверхность образца с покрытием.

После кавитационных испытаний для изучения механизмов эрозионного разрушения проводили РЭМ-исследование изношенных поверхностей и поперечных шлифов образцов с покрытиями.

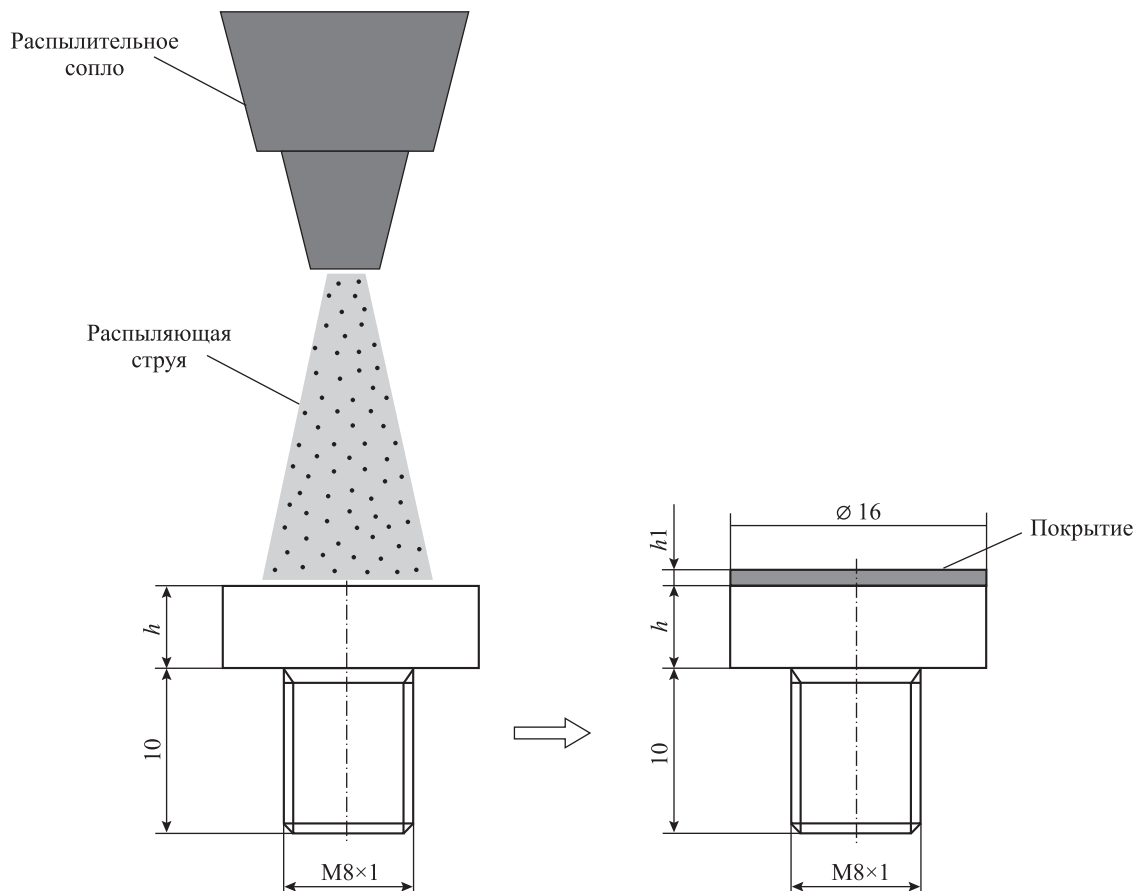


Рис. 1. Подготовка образцов с покрытиями

h – толщина стальной подложки; h_1 – толщина покрытия (400 ± 30 мкм после напыления, 280 ± 20 мкм после шлифования); $h + h_1 = 6$ мм

Fig. 1. Preparation of samples with coatings

h – steel substrate thickness; h_1 – coating thickness (400 ± 30 μm after deposition, 280 ± 20 μm after grinding); $h + h_1 = 6$ mm

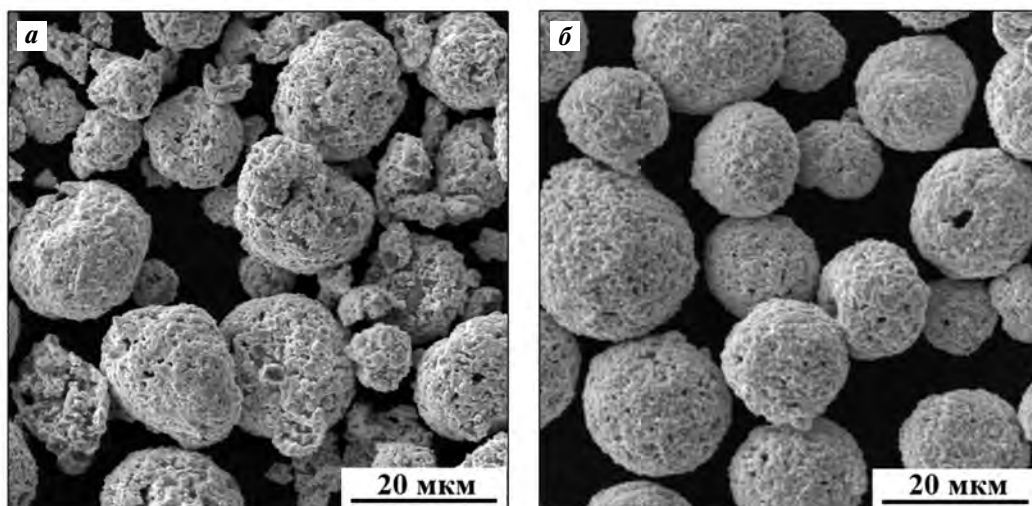


Рис. 2. Микроизображения (РЭМ) напыляемых порошков WC–CoCr (а) и WC–CrC–Ni (б)

Fig. 2. Microimages (SEM) of deposited WC–CoCr (a) and WC–CrC–Ni (b) powders



Рис. 3. Вид установки для кавитационных испытаний

a – схема подачи напряжения; *б* – вид струи, направленной на образец, с приложением ультразвукового воздействия на образец и без него

Fig. 3. Cavitation test setup

a – voltage circuit; *б* – view of the jet directed to the sample with and without ultrasonic impact on the sample

Результаты и их обсуждение

Результаты РЭМ показали, что в структуре покрытия WC—CoCr блочные зерна карбида вольфрама с закругленными краями относительно равномерно распределены в матрице CoCr, размер частиц W_2C не превышает 5 мкм, и трещины в них не обнаружены (рис. 4, *a*). Микроструктура покрытия WC—CrC—Ni (рис. 4, *б*) характеризуется более мелким размером частиц карбидов вольфрама — не более 3,5 мкм. В отличие от покрытия WC—CoCr карбиды вольфрама в покрытии WC—CrC—Ni частично растворяются в матрице на основе никеля, и содержание углерода в них уменьшается.

Это приводит к образованию сложных карбидов, близких к составу $(W,Ni)_3C$. Внедрение атомов Ni в кристаллы W_3C известно из литературы [26]. Структура покрытия WC—CrC—Ni содержит также сложные карбиды $(W,Cr,Ni)_6C$ типа M_6C и небольшое количество карбидов хрома $Cr_{23}C_6$ (см. рис. 4, *б*).

В покрытии WC—CoCr наблюдаются крупные поры (см. рис. 4, *a*), пористость достигает 0,8 %, а в образце WC—CrC—Ni крупные поры практически отсутствуют (см. рис. 4, *б*), а пористость не превышает 0,1 %.

Микротвердость $HV_{0,5}$ покрытий WC—CoCr и WC—CrC—Ni составляет 950 ± 60 и 850 ± 90 соот-

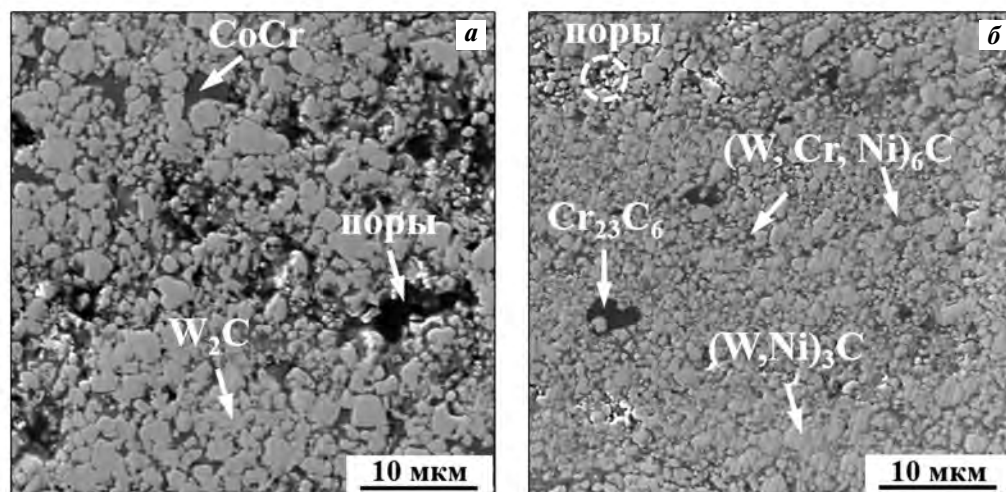


Рис. 4. Микроизображения (РЭМ) исходной структуры покрытий WC—CoCr (*a*) и WC—CrC—Ni (*б*)

Fig. 4. Initial structure microimages (SEM) of WC—CoCr (*a*) and WC—CrC—Ni (*б*) coatings

ветственно. Небольшое преимущество в ее значении у покрытия WC—CoCr обусловлено более высоким содержанием в его структуре карбидов вольфрама.

Данные рис. 5 показывают, что стойкость покрытия WC—CoCr к кавитационной эрозии, определенная по потере объема образца с покрытием после кавитационного воздействия в

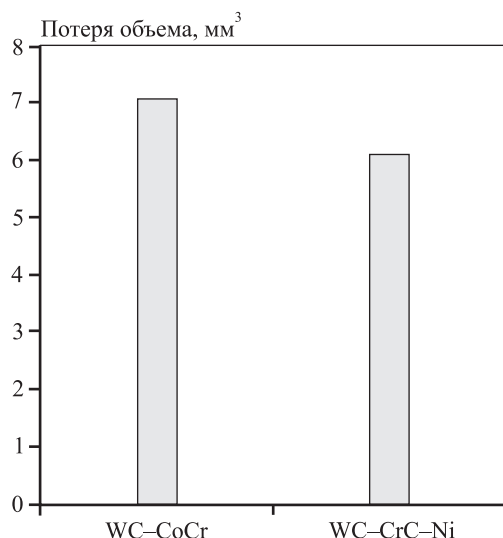


Рис. 5. Стойкость покрытий к кавитационной эрозии, определенная по потере объема после кавитационного воздействия в течение 330 мин

Fig. 5. Cavitation erosion resistance of coatings determined by volume loss after 330 min cavitation impact

течение 330 мин по разработанной методике, на 15 % ниже, чем у WC—CrC—Ni в тех же условиях испытания.

На рис. 6 представлены микроизображения изношенных поверхностей исследуемых покрытий после кавитационного воздействия. Для покрытия WC—CoCr механизм разрушения представляется как объединение дефектов сплошности (пор), уже в нем существующих, с последующим отрывом всей частицы, под которой может находиться крупная пора. В результате на поверхности эрозионного разрушения формируется глубокий и широкий кратер (см. рис. 6, а).

Поверхность разрушения покрытия WC—CrC—Ni после кавитационного воздействия выглядит несколько иначе. Она в большей степени состоит из относительно плоских участков с менее глубокими кратерами (рис. 6, б). Как и в предыдущем случае, источником зарождения микротрещин могут служить поры и другие дефекты. Однако существенно (на порядок) меньшее количество дефектов сплошности в данном покрытии снижает вероятность развития трещин.

В работе [27] показано, что пористость влияет на стойкость к кавитационной эрозии термически напыленных металлокерамических покрытий, которая обратно пропорциональна величине пористости. Таким образом, покрытие WC—CoCr более подвержено кавитационным повреждениям из-за более высокой пористости (см. рис. 4).

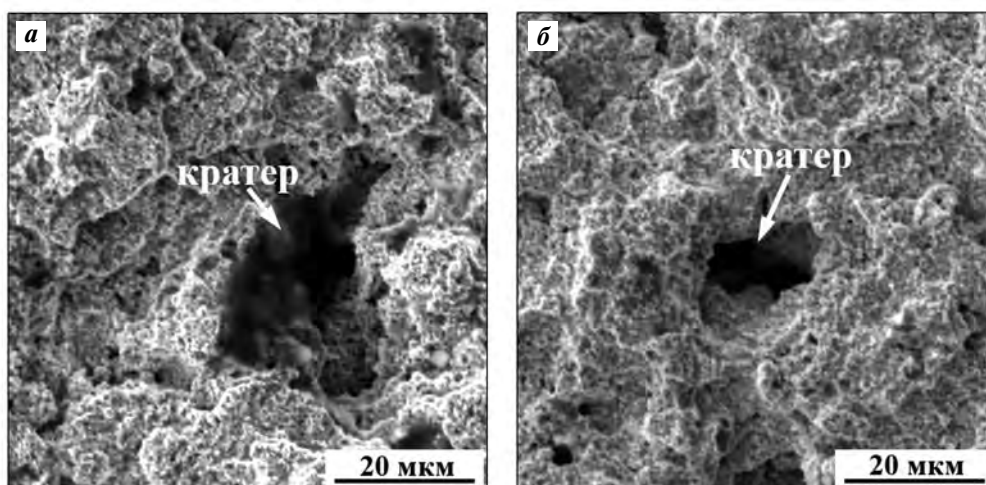


Рис. 6. Микроизображения (РЭМ) изношенных поверхностей покрытий WC—CoCr (а) и WC—CrC—Ni (б) после кавитационного воздействия в течение 330 мин

Fig. 6. Worn surface microimages (SEM) of WC—CoCr (а) and WC—CrC—Ni (б) coatings after 330 min cavitation impact

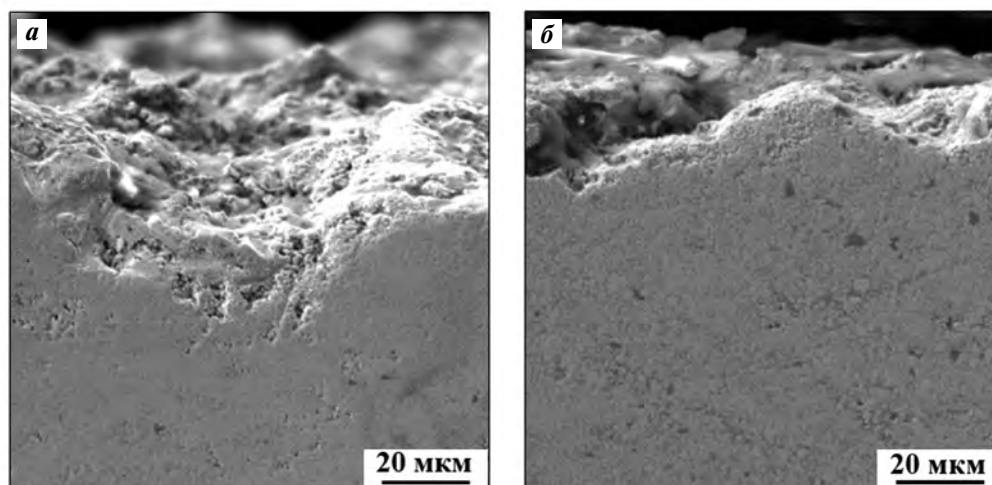


Рис. 7. Микроизображения (РЭМ) поперечных сечений покрытий WC—CoCr (*а*) и WC—CrC—Ni (*б*) после кавитационного воздействия в течение 330 мин

Fig. 7. Cross section microimages (SEM) of WC—CoCr (*a*) and WC—CrC—Ni (*b*) coatings after 330 min cavitation impact

В покрытии WC—CoCr под действием кавитационного нагружения происходят разрушение перемычек между соседними дефектами и рост трещин как в направлении поверхности образца, так и параллельно ей (рис. 7, *а*). При этом в результате выкрашивания материала покрытия из-за объединения микропор образуется кратер.

Таким образом, результаты исследования как изношенной поверхности (см. рис. 6, *а*), так и поперечного шлифа (см. рис. 7, *а*) свидетельствуют, что разрушение покрытия WC—CoCr в результате кавитационного воздействия происходит путем объединения пор под поверхностью материала.

В покрытии WC—CrC—Ni под поверхностью наблюдается существенно меньше повреждений, вызванных кавитационным нагружением (см. рис. 7, *б*), чем в WC—CoCr (см. рис. 7, *а*), и поверхность разрушения в большей степени состоит из относительно плоских участков. Как уже отмечалось (см. рис. 4), пор и других дефектов сплошности в данном покрытии на порядок меньше по сравнению с WC—CoCr. Это снижает вероятность зарождения трещин и последующего отделения части материала с поверхности покрытия с никелем при кавитационном воздействии.

Важно подчеркнуть, что благодаря большей удельной поверхности частиц карбидов в покрытии WC—CrC—Ni (из-за их меньших размеров) для их отделения при разрушении по их более протяженным границам требуется затратить больше энергии при внешнем воздействии. Соответствен-

но, снижается вероятность выкрашивания карбидов при кавитационном износе.

Из рис. 7 также следует, что у покрытия WC—CrC—Ni размеры зоны повреждения и образующихся ямок существенно меньше, чем у WC—CoCr. Это может быть связано не только с различиями в механизмах разрушения, но и с повышенной пластичностью покрытия WC—CrC—Ni вследствие более высокой объемной доли металлической матрицы в его структуре.

Выводы

1. Сравнительные кавитационные испытания по разработанной авторами новой методике проведены для металлокерамических покрытий, содержащих карбиды вольфрама и хрома, полученных методом сверхзвукового газозвукового напыления. Полученные результаты показали, что сопротивление кавитационной эрозии покрытия WC—CrC—Ni примерно на 15 % выше, чем у WC—CoCr, несмотря на то, что у покрытия с никелем твердость немного меньше, чем у WC—CoCr (850 ± 90 HV_{0,5} против 950 ± 60 HV_{0,5}).

2. Вероятными причинами повышенной кавитационной стойкости покрытия WC—CrC—Ni являются следующие:

— существенно меньшее (на порядок) количество дефектов (пор) в сравнении с WC—CoCr снижает вероятность его разрушения по схеме объединения дефектов сплошности (пор), уже су-

шествующих в покрытии, с последующим отрывом отдельных частиц;

— вследствие более высокой дисперсности и, соответственно, большей удельной поверхности частиц карбидов в покрытии WC—CrC—Ni для их отделения при разрушении по более протяженным границам требуются повышенные затраты энергии при внешнем воздействии.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМФ УрО РАН по темам № AAAA-A18-118020190116-6, № AAAA-A19-119070490049-8 и ИМАШ УрО РАН по теме № AAAA-A18-118020790147-4.

Настоящее исследование поддержано проектом № IRA-SME-66316 «cladHEA+» по программе M-ERA.NET, Call 2019-II.

Экспериментальные исследования проводились с использованием оборудования ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург.

Acknowledgments: The research was conducted as part of the government task of the M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences on Topics № AAAA-A18-118020190116-6, № AAAA-A19-119070490049-8 and the Institute of Engineering Science of the Ural Branch of RAS on Topic № AAAA-A18-118020790147-4.

This research was supported by Project No. IRA-SME-66316 «cladHEA+» under the M-ERA.NET, Call 2019-II program.

Experimental studies were conducted using the «Plastometry» common use center equipment of the Institute of Engineering Science of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg.

Литература/References

1. Богачев И.Н. Кавитационное разрушение и кавитационно-стойкие сплавы. М.: Металлургия, 1972. Bogachev I.N. Cavitation damage and cavitation-resistant alloys. Moscow: Metallurgiya, 1972 (In Russ.).
2. Dular M., Delgosha O.C., Petkovšek M. Observations of cavitation erosion pit formation. *Ultrason Sonochem.* 2013. Vol. 20. P. 1113—1120. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2013.01.011.
3. Plesset M.S., Chapman R.B. Collapse of an initially spherical vapor cavity in the neighborhood of a solid boundary. *J. Fluid Mech.* 1971. Vol. 47. P. 283—290. DOI: 10.1017/S0022112071001058.
4. Lauterborn W., Bolle H. Experimental investigation of cavitation bubble collapse in the neighborhood of a solid boundary. *J. Fluid Mech.* 1975. Vol. 72. P. 391—399. DOI: 10.1017/S0022112075003448.
5. Dular M., Bachert B., Stoffel B., Širok B. Relationship between cavitation structures and cavitation damage. *Wear.* 2004. Vol. 257. P. 1176—1184. DOI: 10.1016/j.wear.2004.08.004.
6. Brujan E.A., Ikeda T., Matsumoto Y. Shock wave emission from a cloud of bubbles. *Soft Mater.* 2012. Vol. 8. P. 5777—5783. DOI:10.1039/C2SM25379H.
7. Philipp A., Lauterborn W. Cavitation erosion by single laser-produced bubbles. *J. Fluid Mech.* 1998. Vol. 361. P. 75—116. DOI: 10.1017/S0022112098008738.
8. Коробов Ю.С., Алван Х.Л., Филиппов М.А., Шумяков В.И., Соболева Н.Н., Сирош В.А., Эстемирова С.Х., Макаров А.В. Сравнение кавитационной стойкости наплавленного металла со структурой метастабильного и стабильного аустенита. *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение.* 2020. Т. 22. No. 4. С. 33—41. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.4.05. Korobov Yu.S., Alwan H.L., Filippov M.A., Shumyakov V.I., Soboleva N.N., Sirosh V.A., Estemirova S.H., Makarov A.V. Comparative study on cavitation resistance of deposited metal with metastable structure and stable austenite. *Vestnik PNIPU. Mashinostroenie, materialovedenie.* 2020. Vol. 22. No. 4. P. 33—41 (In Russ.).
9. Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Сытченко А.Д., Левашов Е.А. Сравнительное исследование электроискровых покрытий, полученных с использованием электродов TiC—NiCr и TiC—NiCr—Eu₂O₃. *Известия вузов. Цветная металлургия.* 2019. No. 5. С. 67—78. DOI: 10.17073/0021-3438-2019-5-67-78. Kiryukhantsev-Korneev P.V., Sytchenko A.D., Levashov E.A. Comparative study of coatings formed by electrospark alloying using TiC—NiCr and TiC—NiCr—Eu₂O₃ electrodes. *Russ. J. Non-ferr. Met.* 2019. Vol. 60. No. 6. P. 662—672. DOI: 10.3103/S1067821219060099.
10. Князева Ж.В., Юдин П.Е., Петров С.С., Максимук А.В. Применение металлизационных покрытий для защиты погружных электродвигателей насосного оборудования от воздействия осложняющих факторов в нефтяных скважинах. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* 2020. No. 1. С. 75—86. DOI: 10.17073/1997-308X-2020-75-86. Knyazeva Zh.V., Yudin P.E., Petrov S.S., Maksimuk A.V. Using metal-sprayed coatings to protect submersible electric pump motors from the impact of complicating factors in oil wells. *Russ. J. Non-ferr. Met.* 2020. Vol. 61. No. 5. P. 592—599. DOI: 10.3103/S1067821220050065.
11. Бирюков В.П., Базлова Т.А. Экспериментальное и расчетное определения коэффициента износостойкости покрытий с добавками нанодисперсных частиц карбидов при лазерной наплавке. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* 2020. No. 2. С. 73—80. DOI: 10.17073/1997-308X-2020-2-73-80. Biryukov V.P., Bazlova T.A. Experimental and computational determination of the wear resistant coefficient

- for coatings with nanodispersed carbide particles added by laser surfacing. *Russ. J. Non-ferr. Met.* 2020. Vol. 61. No. 6. P. 739–744. DOI: 10.3103/S1067821220060048.
12. Korobov Yu.S., Alwan H.L., Filippov M.A., Soboleva N.N., Alani I.A., Estemirova S.H., Makarov A.V. The effect of martensitic transformation on the cavitation erosion resistance of a TIG-deposited Fe—Cr—C—Al—Ti layer. *Surf. Coat. Technol.* 2021. Art. 127391. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127391.
 13. Kumar R.K., Kamaraj M., Seetharamu S., Pramod T., Sampathkumaran P. Effect of spray particle velocity on cavitation erosion resistance characteristics of HVOF and HVOF processed 86WC—10Co4Cr hydro turbine coatings. *J. Therm. Spray Technol.* 2016. Vol. 25. P. 1217–1230. DOI: 10.1007/s11666-016-0427-3.
 14. Alwan H.L., Korobov Yu.S., Soboleva N.N., Lezhnin N.V., Makarov A.V., Deviatarov M.S. Study of cavitation erosion—corrosion resistance of thermally sprayed Ni—based coatings prepared by HVOF process. *Solid State Phenom.* 2020. Vol. 299. P. 893–901. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.893.
 15. Wang Q., Tang Z., Cha L. Cavitation and sand slurry erosion resistances of WC—10Co—4Cr coatings. *J. Mater. Eng. Perform.* 2015. Vol. 24. P. 2435–2443. DOI: 10.1007/s11665-015-1496-z.
 16. Wu Y., Hong S., Zhang J., Zhihua H., Wenmin G., Qian W., Gai E. Li. Microstructure and cavitation erosion behavior of WC—Co—Cr coating on 1Cr18Ni9Ti stainless steel by HVOF thermal spraying. *Int. J. Refract. Hard Met.* 2012. Vol. 32. P. 21–26. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2012.01.002.
 17. Toma D., Brandl W., Marginean G. Wear and corrosion behaviour of thermally sprayed cermet coatings. *Surf. Coat. Technol.* 2001. Vol. 138. P. 149–158. DOI: 10.1016/S0257-8972(00)01141-5.
 18. Berger L.-M. Binary WC- and Cr₃C₂-containing hard-metal compositions for thermally sprayed coatings. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2016. Vol. 118. P. 012010.
 19. Ding Z.-X., Chen W., Wang Q. Resistance of cavitation erosion of multimodal WC—12Co coatings sprayed by HVOF. *J. Nonferr. Metal. Soc.* 2011. Vol. 21. P. 2231–2236. DOI: 10.1016/S1003-6326(11)61000-5.
 20. Hong S., Wu Y., Zhang J., Zheng Yu., Zheng Y., Lin J. Synergistic effect of ultrasonic cavitation erosion and corrosion of WC—CoCr and FeCrSiBMn coatings prepared by HVOF spraying. *Ultrason Sonochem.* 2016. Vol. 31. P. 563–569. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2016.02.011.
 21. Souza V.A.D., Neville A. Linking electrochemical corrosion behaviour and corrosion mechanisms of thermal spray cermet coatings (WC—CrNi and WC/CrC—CoCr). *Mater. Sci. Eng.* 2003. Vol. A352. P. 202–211. DOI: 10.1016/S0921-5093(02)00888-2.
 22. 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. *Surf. Coat. Technol.* 2008. Vol. 202. P. 1405–1417. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.06.048.
 23. Ding X., Cheng X.-D., Yuan C.-Q., Shi J., Ding Z.-X. Structure of micro-nano WC—10Co4Cr coating and cavitation erosion resistance in NaCl solution. *Chin. J. Mech. Eng.* 2017. Vol. 30. P. 1239–1247. DOI: 10.1007/s10033-017-0162-9.
 24. Шумяков В.И., Коробов Ю.С., Алван Х.Л., Лежнин Н.В., Макаров А.В., Девятаров М.С. Установка для испытаний на кавитационную эрозию: Пат. 2710480 (РФ). Заяв. No. 2018130210 (20.08.2018). Опубл. 26.12.2019. Бюл. No. 36.
Shumyakov V.I., Korobov Yu.S., Alwan H.L., Lezhnin N.V., Makarov A.V., Deviatarov M.S. Installation for cavitation erosion testing: Pat. No. 2710480 (Russia). Appl. No. 2018130210 (20.08.2018). Publ. 26.12.2019. Bull. No. 36 (In Russ.).
 25. ASTM, Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus. G 32 — 10. 2011. P. 1–19.
 26. Zhang S., Gao G., Zhu H., Cai L., Jiang X., Lu S., Duan F., Dong W., Chai Y., Du M. In situ interfacial engineering of nickel tungsten carbide Janus structures for highly efficient overall water splitting. *Sci. Bulletin.* 2020. Vol. 65. P. 640–650. DOI: 10.1016/j.scib.2020.02.003.
 27. Sugiyama K., Nakahama S., Hattori S., Nakano K. Slurry wear and cavitation erosion of thermal-sprayed cermets. *Wear.* 2005. Vol. 258. P. 768–775. DOI: 10.1016/j.wear.2004.09.006.