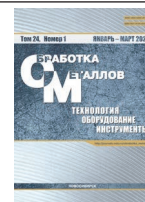




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Сравнительная стойкость против кавитационной эрозии аустенитных сталей различного уровня метастабильности





Юрий Коробов^{1, a, *}, Хуссам Алван^{2, b}, Алексей Макаров^{1, c}, Владимир Кукареко^{3, d},
 Виталий Сирош^{1, e}, Михаил Филиппов^{2, f}, Светлана Эстемирова^{4, g}





¹ Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620108, Россия





² Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620002, Россия



³ Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси, ул. Академическая, 12, г. Минск, 220072, Беларусь

⁴ Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук, ул. Амундсена, 101, г. Екатеринбург, 620016, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0003-0553-918X>,  yukorobov@gmail.com, ^b  <https://orcid.org/0000-0002-2955-204X>,  lefta.hussam@gmail.com,

^c  <https://orcid.org/0000-0002-2228-0643>,  av-mak@yandex.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0003-4283-871X>,  v_kukareko@mail.ru,

^e  <https://orcid.org/0000-0002-8180-9543>,  sirosh.imp@yandex.ru, ^f  <https://orcid.org/0000-0002-0733-4607>,  filma1936@mail.ru,

^g  <https://orcid.org/0000-0001-7039-1420>,  esveta100@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.92: 532.528.6

История статьи:

Поступила: 17 декабря 2021

Рецензирование: 17 января 2022

Принята к печати: 28 января 2022

Доступно онлайн: 15 марта 2022

Ключевые слова:

Стойкость против кавитации

Метастабильный аустенит

Мартенситное фазовое

превращение

Микроструктура

Наплавленные покрытия

Финансирование:

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМФ УрО РАН по темам № АААА-А18-118020190116-6, № АААА-А19-119070490049-8. Настоящее исследование поддержано проектом № IRA-SME-66316 «cladHEA+» по программе M-ERA.NET, Call 2019-II.

Благодарности:

Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов».

Для цитирования: Сравнительная стойкость против кавитационной эрозии аустенитных сталей различного уровня метастабильности / Ю.С. Коробов, Х.Л. Алван, А.В. Макаров, В.А. Кукареко, В.А. Сирош, М.А. Филиппов, С.Х. Эстемирова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 61–72. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.1-61-72.

*Адрес для переписки

Коробов Юрий Станиславович, д.т.н.,
 зав. лаб. лазерной и плазменной обработки
 Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,
 ул. Софьи Ковалевской, 18,
 620108, г. Екатеринбург, Россия
 Тел.: 8 (919) 379-20-16, e-mail: yukorobov@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Критичные по надежности компоненты оборудования, контактирующие с высокоскоростными жидкими средами (например, лопасти турбины гидростанций, крыльчатки насосов, корабельные винты), подвержены одному из видов износа – кавитационной эрозии. **Целью работы** был выбор и научное обоснование вида покрытия и его структурно-фазового состояния для эффективной защиты деталей от кавитационной эрозии. **Методы исследования.** В исследовании проведен сравнительный анализ различий в эрозионной стойкости характерных аустенитных сталей в виде объемного материала (316L) и покрытий (E308L, 60X8TiO), используемых для защиты от кавитации. Для нанесения покрытий использовали дуговую наплавку, ручную и неплавящимся электродом в аргоне. Испытания проведены на оригинальной установке оценки кавитационной стойкости материалов при наложении ультразвука и разности электрических потенциалов. **Результаты и обсуждение.** Результаты показывают, что 60X8TiO имеет более высокую стойкость против кавитационной эрозии, чем E308L и 316L, в 4 и 10 раз соответственно. При анализе причин различий кавитационной стойкости выявлены структурные факторы, определяющие сопротивление эрозионному разрушению. Впервые установлена сильная зависимость эрозионной стойкости аустенитных сталей от интенсивности развивающегося под действием кавитации деформационного мартенситного превращения, которое способствует повышению кавитационной стойкости. В метастабильной аустенитной стали в начальный период испытаний в поверхностном слое происходит образование мартенсита деформации (α'), вызывающее рост твердости, диссипацию энергии внешнего воздействия и появление сжимающих напряжений, препятствующих возникновению микротрещин. В дальнейшем происходит дополнительное упрочнение ранее сформированных дисперсных кристаллов α' -мартенсита. В 60X8TiO указанные эффекты проявились значительно сильнее, чем в E308L и 316L, вследствие более низкой стабильности аустенита и образования углеродистого мартенсита деформации.

Введение

Критичные по надежности компоненты оборудования, контактирующие с высокоскоростными жидкими средами (например, лопатки турбины гидростанций, крыльчатки насосов, корабельные винты), подвержены одному из видов износа – кавитационной эрозии [1–5]. Кавитация инициирует ударные волны высокого давления, свыше 1500 МПа [6, 7], а скорость возникающих микроструй жидкости может превышать 120 м/с [8–10]. На поверхности, подверженной кавитации, происходит локальная пластическая деформация с последующим разрушением частиц материала с поверхности [11, 12].

Появляющиеся при этом дефекты (микропоры или полости) приводят к снижению эффективности оборудования и увеличению затрат на ремонт [13]. На рис. 1 представлен типичный пример кавитационно-эрозионного повреждения крыльчатки насоса, изготовленной из аустенитной нержавеющей стали 316L (российский аналог 03X18H12M2) и используемой в системах охлаждения электростанций. Сообщается, что AISI 316 не обладает высокой стойкостью против кавитационной эрозии [14].

Поверхностная обработка перспективна для уменьшения кавитационных повреждений [15, 16]. Другим направлением повышения стойкости деталей против кавитационной эрозии является нанесение покрытий наплавкой [17–19] и газотермическим напылением [5, 20, 21]. Дуговая наплавка широко используется вследствие относительно невысокой стоимости и возможности получения при этом плотных покрытий [22]. В качестве материала для наплавки полу-

чили распространение, в частности, аустенитные электроды/проволока типа Е308L-17 (российский аналог 03X19H10) по причине хорошей свариваемости и адекватной стойкости против кавитации [23, 24]. Метастабильные аустенитные стали (МАС) потенциально являются многообещающей альтернативой более дорогим сплавам на основе Co, Ni. В МАС приложение внешней нагрузки вызывает превращение метастабильного аустенита (γ) в мартенсит деформации (α'), сопровождающееся синергетическими эффектами. Во-первых, увеличение доли мартенситной фазы приводит к увеличению твердости. Во-вторых, энергия внешней нагрузки, приложенная к поверхности, рассеивается из-за деформационного зарождения мартенсита. Кроме того, вследствие фазового перехода $\gamma \rightarrow \alpha'$ в поверхностном слое детали возникают сжимающие напряжения, препятствующие возникновению микротрещин [25]. В результате улучшается износостойкость в разных условиях (например, абразивные, гидро- и газоабразивные, эрозионные, кавитационные, адгезионные и усталостные нагрузки) [26, 27]. Для МАС 50Ni9Cr5 показано, что фазовый переход $\gamma \rightarrow \alpha'$ происходит при пороговом уровне внешней нагрузки от 1000 до 2500 МПа с увеличением исходного количества мартенсита с 15 до 75 %. При напряжениях, превышающих пороговое значение, количество деформационного мартенсита линейно растет с ростом напряжений [28]. Авторами получены аналогичные результаты для покрытий из МАС типа 50Cr18 под действием высоко динамичных ударных нагрузок [29], а для покрытий из 60X8ТЮ – при абразивном воздействии [30]. Приведенный уровень внешних

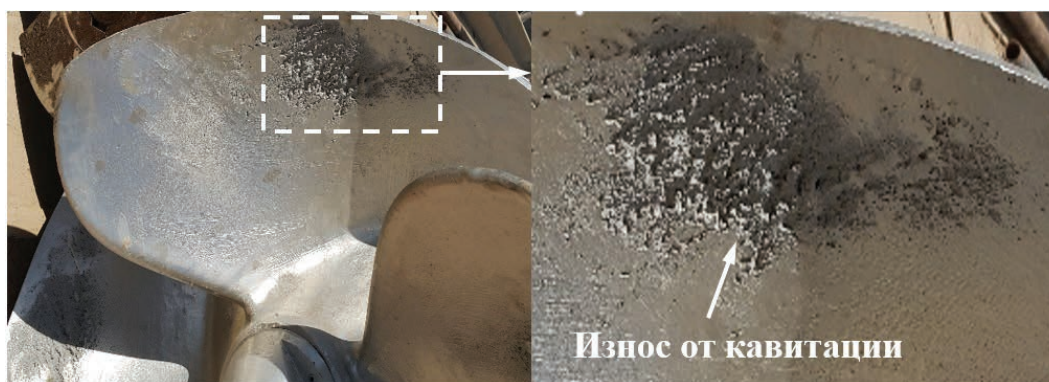


Рис. 1. Кавитационный износ крыльчатки водяного насоса

Fig. 1. Cavitation wear of water pump impeller

нагрузок соответствует кавитационным нагрузкам более 1500 МПа, как показано выше [6–10], что дает основание полагать возможность фазового перехода $\gamma \rightarrow \alpha'$ в МАС 60Х8ТЮ при кавитации.

Целью данного исследования является оценка стойкости против кавитационной эрозии и анализ структурных изменений в наплавленном покрытии из стали 60Х8ТЮ в сравнении с аустенитными сталями 316L (объемная заготовка) и E308L-17 (наплавленный слой).

Методика исследований

В работе исследованы объемная заготовка из стали AISI 316L, покрытия на подложке из AISI 316L, наплавленные на установке Шторм-LORCH, S серия (Шторм, Екатеринбург, Россия) порошковой проволокой 60Х8ТЮ $\varnothing 1,6$ мм и электродом E308L-17 $\varnothing 2,5$ мм. Химический состав указанных материалов по данным производителей, мас. %:

AISI 316L – C $\leq 0,03$; Cr 16,5-18,0; Ni 10,0-13,0; Mo 2,0-2,5; Mn ≤ 2 ; P $\leq 0,045$; S $\leq 0,03$; Ti $\leq 0,5$; остальное – Fe;

60Х8ТЮ – C 0,6; Cr 8,0; Al 1,5; Ti 1,0; остальное – Fe;

E308L-17 – C 0,03; Cr 19; Ni 10; Si 0,86; Mn 0,51; Nb 0,30; P 0,03; S 0,01; остальное – Fe.

Наплавку 60Х8ТЮ производили дуговой сваркой неплавящимся электродом в среде

инертного газа (TIG), ток 90...110 А, напряжение 12 В и расход аргона 12...15 л/мин. Наплавку E308L-17 выполняли ручной дуговой сваркой (РДС), ток 70...75 А, напряжение 25 В.

Образцы для испытаний (рис. 2) были подготовлены в соответствии с ASTM G32–10 [31], кавитации подвергалась торцевая часть образца $\varnothing 16$ мм.

Для оценки эрозионного износа использовали оригинальную установку [32], в которой реализован эффект возникновения кавитации под влиянием ультразвука на струю жидкости, поступающую на поверхность (рис. 3). Постоянство состава, напора и температуры жидкости обеспечено по алгоритму обратных связей, реализованному в контроллере. Подача напряжения между соплом и образцом добавляет электрохимическое воздействие за счет анодной поляризации, что усиливает эрозионный износ. Величина напряжения выбрана минимальной, при которой проявляется эффект ускорения эрозии.

Предложенная схема кавитационного воздействия отличается от стандартизированной [31] взаимным расположением образца и струи воды и указанными выше особенностями конструкции. Это позволяет ускорить испытания, повысить достоверность и стабильность результатов в сравнении с аналогами [33, 34].

Режимы проведения кавитационных испытаний приведены в табл. 1. Стойкость против кавитационной эрозии сравнивали по критерию

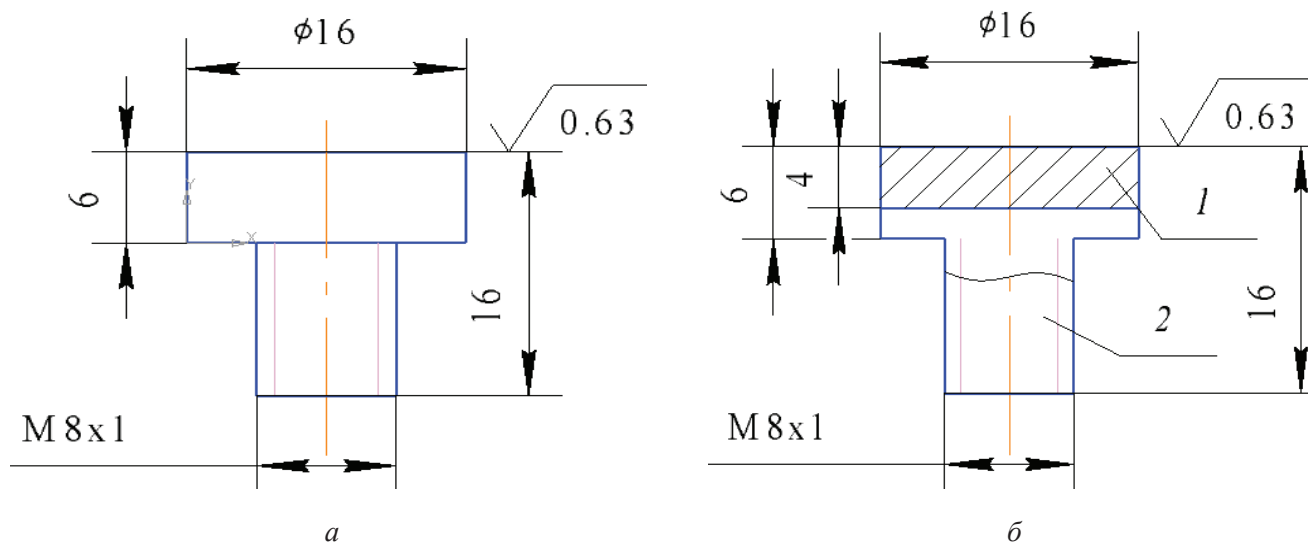


Рис. 2. Образцы для кавитационных испытаний:

а – образец из стали AISI 316L; б – образец с наплавленным покрытием; 1 – наплавленный слой; 2 – подложка

Fig. 2. Samples for the cavitation tests:

а – AISI 316L steel sample; б – the sample with a deposited coating; 1 – deposited layer; 2 – substrate

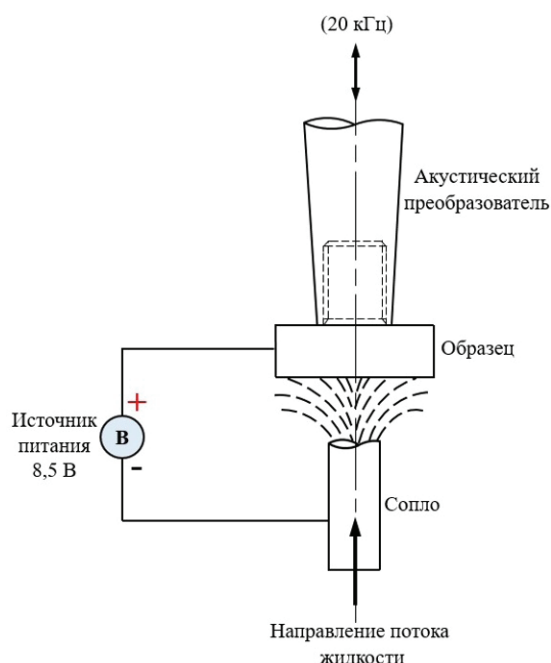


Рис. 3. Схема установки для испытаний на кавитационную эрозию

Fig. 3. Scheme of the installation for cavitation erosion testing

потери массы. Испытания на кавитацию прерывали через нерегулярные интервалы для взвешивания испытуемого образца. Перед и после каждого интервала образец очищали ацетоном, сушили теплым воздухом в течение 30...40 с и взвешивали на весах с точностью 0,5 мг. Разница между начальной массой образца и измеренной массой после кавитационных воздействий представляет собой потерю массы в каждом интервале испытаний.

Для изучения фазовых превращений, происходящих при кавитации, был выполнен рентгеновский дифракционный анализ (РДА) на дифрактометре Shimadzu XRD - 7000 (Shimadzu, Япония). Условия съемки: излучение – Cu K α , графитовый монохроматор, угловой диапазон $2\theta = 30...115^\circ$, тип съемки – пошаговый, шаг сканирования $0,04^\circ$, экспозиция – 3 с. Анализ производили для образцов после испытаний, длительность которых соответствовала времени замеров потери массы.

Таблица 1
Table 1

Режимы испытания на кавитационную стойкость
Cavitation test modes

Параметр / Parameter	Значение / Value
Частота колебаний, кГц / Vibration frequency, kHz	$20 \pm 0,1$
Амплитуда колебаний, мкм / Peak-to-peak displacement amplitude, μm	$53 \pm 3,0$
Среда испытаний / Test environment	Водопроводная вода, pH $7,5 \pm 0,20$ / Tap water, pH 7.5 ± 0.20
Приложенное напряжение, В / Applied voltage, V	8,5
Время кавитации, мин / Testing time, min	300
Температура / Temperature	Комнатная / Room

Результаты и их обсуждение

В табл. 2 приведены результаты кавитационных испытаний.

Испытания показали, что 60X8ТЮ имеет более высокую стойкость против кавитационной эрозии по сравнению с AISI 316L и E308L-17,

примерно соответственно в 10 и 4 раза выше. Заметный рост темпа износа у AISI 316L и E308L-17 в сравнении с 60X8ТЮ наблюдается соответственно через 40 и 90 мин.

Согласно РДА (рис. 4), до кавитационных испытаний доля α -фазы в поверхностном слое 60X8ТЮ составляла 29,5 %, в AISI 316L – 2 %, в E308L-17 – 10,5 %.

Результаты кавитационных испытаний

Cavitation test results

Время испытаний, мин / Testing time, min	Потеря массы, мг / Weight loss, mg		
	AISI 316L	E308L-17	60X8TiO
0	0,00	0,00	0,00
5	0,67	0,47	0,10
10	1,10	0,75	0,31
20	1,65	0,90	0,66
40	2,02	1,03	0,87
60	2,90	1,13	0,99
90	5,04	1,57	1,24
120	7,74	2,43	1,48
180	15,44	4,72	1,76
240	22,13	8,07	2,06
300	28,65	12,13	2,49

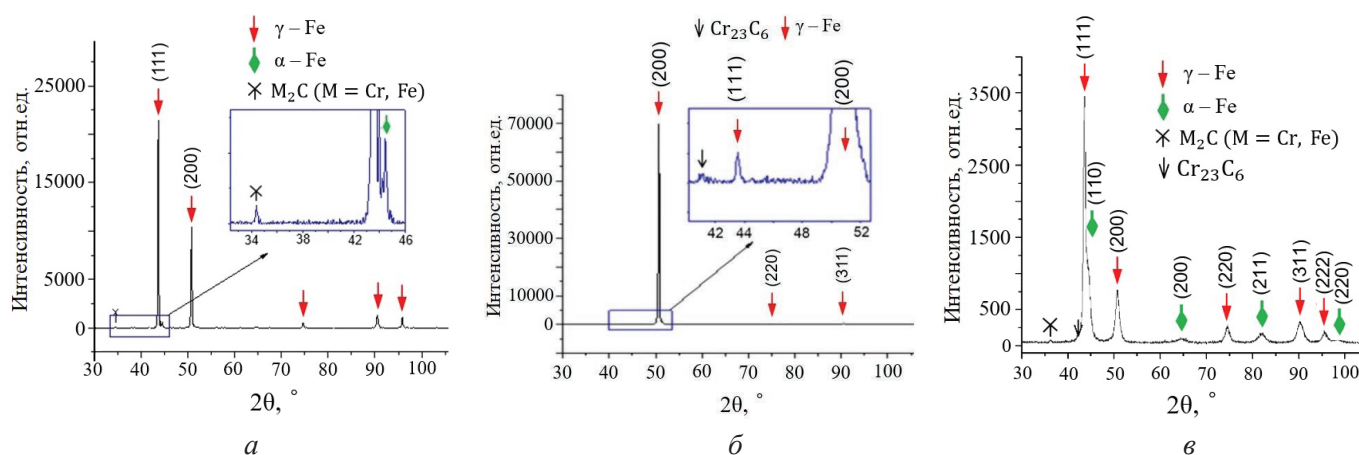


Рис. 4. Рентгеновские дифрактограммы образцов перед кавитационными испытаниями:

а – AISI 316L; б – E308L-17; в – 60X8TiO

Fig. 4. XRD patterns of the samples before cavitation tests:

а – AISI 316L; б – E308L-17; в – 60Cr8TiAl

а в поверхностном слое покрытия E308L-17 α -фазы обнаружено не было.

Представленное сочетание аустенита и мартенсита в 60X8TiO обусловлено влиянием легирующих элементов. Углерод является сильным аустенизатором, а при данном соотношении C/Cr начальная температура мартенситного превращения (M_s) уменьшается. Расчеты по прогнозным уравнениям применительно к основному химическому составу 0,6 % C и 8 % Cr [35] пока-

зали, что M_s находится в диапазоне 170...220 °C. Алюминий и титан в указанных пределах провоцируют $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение и способствуют увеличению количества центров кристаллизации и получению мелкозернистой структуры [36].

В процессе испытаний согласно РДА зафиксировано увеличение количества мартенсита деформации в поверхностном слое всех образцов, рис. 5.

В 60X8TiO доля мартенсита увеличилась до 73 %, что значительно выше, чем в E308L-17 и

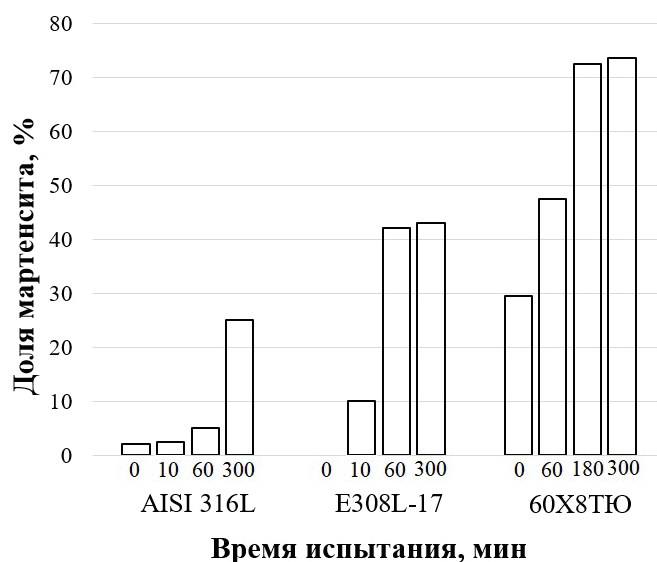


Рис. 5. Изменение доли мартенсита при кавитационных испытаниях

Fig. 5. Change in the proportion of martensite during cavitation tests

AISI 316L. Это свидетельствует о значительном понижении стабильности аустенита в 60X8TЮ.

Образование мартенсита деформации вызывает рост твердости, диссипацию энергии внешнего воздействия и появление сжимающих напряжений, препятствующих возникновению микротрещин. Для 60X8TЮ и E308L-17 угол наклона кривых зависимости доли мартенсита от продолжительности испытаний меняется, что свидетельствует о стабилизации аустенита. В дальнейшем при незначительном увеличении доли мартенсита происходит дополнительное деформационное упрочнение ранее сформированных дисперсных кристаллов α' -мартенсита. Для стали AISI 316L в течение первых 60 мин кавитации заметного образования α' -мартенсита не наблюдалось. Это свидетельствует о высокой стабильности аустенита, что подтверждается и другими исследованиями [26]. Только длительное кавитационное воздействие (в течение 300 мин) привело к образованию 25 % мартенсита на поверхности металла. Это означает, что формирование α' -мартенсита происходит в уже упрочненном аустените этой стали.

Сопоставление результатов кавитационных испытаний и данных РДА показывает, что имеет

место корреляционная зависимость эрозионной стойкости аустенитных сталей от интенсивности развивающегося под действием кавитации мартенситного превращения, которое способствует повышению кавитационной стойкости, рис. 6.

Сильное влияние мартенситного превращения на стойкость против кавитационной эрозии показано также для аустенитной стали 304 [37, 38], близкой по системе легирования рассмотренной стали AISI 316 и покрытию из E308L-17.

Таким образом, можно заключить, что кавитационное нагружение покрытия из 60X8TЮ приводит к фазовому превращению $\gamma \rightarrow \alpha'$ аналогично абразивному воздействию. Это вызывает характерные для метастабильных аустенитных сталей синергетические эффекты повышения твердости, диссипации энергии, росту напряжений в поверхностном слое. Результатом этих эффектов является повышенная стойкость покрытия из 60X8TЮ в сравнении с распространенными материалами для деталей, работающих в применениях с кавитационным нагружением.

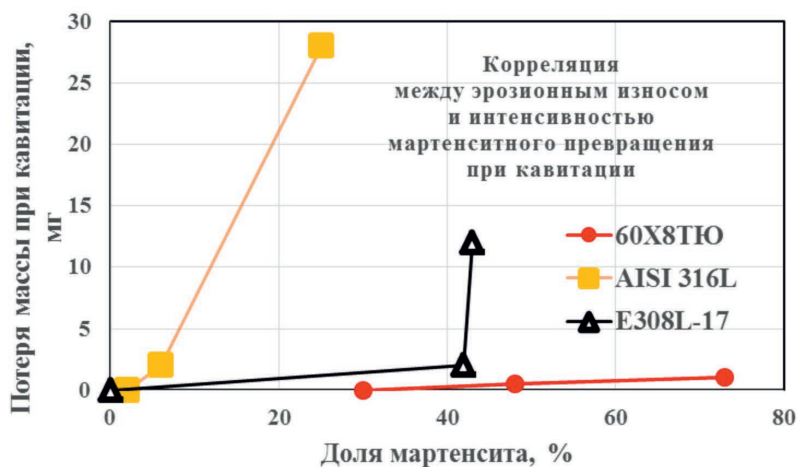


Рис. 6. Корреляция между эрозионным износом и интенсивностью мартенситного превращения при кавитации

Fig. 6. Correlation between erosive wear and the intensity of martensitic transformation during cavitation

Выводы

1. Показан и обоснован механизм поверхностного упрочнения в метастабильной аустенитной стали в процессе кавитации. В начальный период испытаний в поверхностном слое происходит образование мартенсита деформации (α'). В дальнейшем происходит дополнительное де-

формационное упрочнение ранее сформированных дисперсных кристаллов α' -мартенсита.

2. Кавитационное воздействие на поверхность метастабильной аустенитной стали приводит к деформационному превращению мартенсита, как и при ранее рассмотренных воздействиях на аналогичные стали высокочастотных ударных нагрузок и абразивного изнашивания. Это свидетельствует об одинаковом уровне внешних удельных нагрузок при всех указанных видах нагружения.

3. Имеет место корреляционная зависимость эрозионной стойкости аустенитных сталей от интенсивности развивающегося под действием кавитации мартенситного превращения. В покрытии из стали 60X8ТЮ с наибольшей интенсивностью указанного превращения эрозионная стойкость выше соответственно в 4 и 10 раз в сравнении с типовыми для применений с кавитационным нагружением, сталью AISI 316L и покрытием из стали E308L-17.

Список литературы

1. Богачев И.Н. Кавитационное разрушение и кавитационно-стойкие сплавы. – М.: Металлургия, 1972. – 192 с.

2. Singh R., Tiwari S.K., Mishra S.K. Cavitation erosion in hydraulic turbine components and mitigation by coatings: current status and future needs // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2012. – Vol. 21. – P. 1539–1551. – DOI: 10.1007/s11665-011-0051-9.

3. Adamkowski A., Henke A., Lewandowski M. Resonance of torsional vibrations of centrifugal pump shafts due to cavitation erosion of pump impellers // *Engineering Failure Analysis*. – 2016. – Vol. 70. – P. 56–72. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2016.07.011.

4. Горбаченко Е.О. Оценка долговечности металлических материалов и судового оборудования при кавитационном изнашивании методом профилометрии: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2019. – 150 с.

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

6. Vyas B., Preece C. Cavitation erosion of face centered cubic metals // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 1977. – Vol. 8. – P. 915–923. – DOI: 10.1007/BF02661573.

7. Brujan E.A., Ikeda T., Matsumoto Y. Shock wave emission from a cloud of bubbles // *Soft Matter*. – 2012. – Vol. 8, iss. 21. – P. 5777–5783. – DOI: 10.1039/C2SM25379H.

8. Lauterborn W., Bolle H. Experimental investigation of cavitation bubble collapse in the neighborhood of a solid boundary // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1975. – Vol. 72. – P. 391–399. – DOI: 10.1017/S0022112075003448.

9. Plesset M.S., Chapman R.B. Collapse of an initially spherical vapor cavity in the neighborhood of a solid boundary // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1971. – Vol. 47. – P. 283–290. – DOI: 10.1017/S0022112071001058.

10. Relationship between cavitation structures and cavitation damage / M. Dular, B. Bachert, B. Stoffel, B. Širok // *Wear*. – 2004. – Vol. 257. – P. 1176–11841. – DOI: 10.1016/j.wear.2004.08.004.

11. Vyas B., Preece C. Stress produced in a solid by cavitation // *Journal of Applied Physics*. – 1976. – Vol. 47. – P. 5133–5138. – DOI: 10.1063/1.322584.

12. Pohl M., Stella J., Hensing C. Comparative study on CuZnAl and CuMnZnAlNiFe shape memory alloys subjected to cavitation-erosion // *Advanced Engineering Materials*. – 2003. – Vol. 5. – P. 251–256. – DOI: 10.1002/adem.200300341.

13. Espitia L.A., Toro A. Cavitation resistance, microstructure and surface topography of materials used for hydraulic components // *Tribology International*. – 2010. – Vol. 43. – P. 2037–2045. – DOI: 10.1016/j.triboint.2010.05.009.

14. Chiu K.Y., Cheng F.T., Man H.C. Cavitation erosion resistance of AISI 316L stainless steel laser surface-modified with NiTi // *Materials Science and Engineering: A*. – 2005. – Vol. 392. – P. 348–358. – DOI: 10.1016/j.msea.2004.09.035.

15. Residual stress and microstructure evolutions of SAF 2507 duplex stainless steel after shot peening / M. Chen, H. Liu, L. Wang, Z. Xu, V. Ji, C. Jiang // *Applied Surface Science*. – 2018. – Vol. 459. – P. 155–163. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.07.182.

16. Park I.-C., Kim S.-J. Effect of pH of the sulfuric acid bath on cavitation erosion behavior in natural seawater of electroless nickel plating coating // *Applied Surface Science*. – 2019. – Vol. 483. – P. 194–204. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.03.277.

17. Cavitation erosion-corrosion resistance of deposited austenitic stainless steel/E308L-17 electrode / H.L. Alwan, Yu.S. Korobov, N.N. Soboлева, N.V. Lezhnin, A.V. Makarov, E.P. Nikolaeva, M.S. Deviatarov // *Solid State Phenomena*. – 2020. – Vol. 299. – P. 908–913. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.908.

18. Gualco A., Svoboda H.G., Surian E.S. Effect of welding parameters on microstructure of Fe-based nanostructured weld overlay deposited through FCAW-S // *Welding International*. – 2016. – Vol. 30. – P. 573–580. – DOI: 10.1080/09507116.2015.1096533.

19. Sreedhar B.K., Albert S.K., Pandit A.B. Improving cavitation erosion resistance of austenitic stainless steel in liquid sodium by hardfacing – comparison of Ni and Co based deposits // *Wear*. – 2015. – Vol. 342–343. – P. 92–99. – DOI: 10.1016/j.wear.2015.08.009.
20. Abrasion, erosion and cavitation erosion wear properties of thermally sprayed alumina based coatings / V. Matikainen, K. Niemi, H. Koivuluoto, P. Vuoristo // *Coatings*. – 2014. – Vol. 4. – P. 18–36. – DOI: 10.3390/coatings4010018.
21. Effect of spray particle velocity on cavitation erosion resistance characteristics of HVOF and HVOF processed 86WC-10Co4Cr hydro turbine coatings / R.K. Kumar, M. Kamaraj, S. Seetharamu, T. Pramod, P. Sampathkumaran // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2016. – Vol. 25. – P. 1217–1230. – DOI: 10.1007/s11666-016-0427-3.
22. Solidified microstructure of wear-resistant Fe-Cr-C-B overlays / J. Li, R. Kannan, M. Shi, L. Li // *Metallurgical and Materials Transactions B*. – 2020. – Vol. 51. – P. 1291–1300. – DOI: 10.1007/s11663-020-01863-3.
23. Tôn-Thất L. Experimental comparison of cavitation erosion rates of different steels used in hydraulic turbines // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2010. – Vol. 12. – P. 1–9. – DOI: 10.1088/1755-1315/12/1/012052.
24. Thermal spray and weld repair alloys for the repair of cavitation damage in turbines and pumps: a technical note / A. Kumar, J. Boy, R. Zatorski, L.D. Stephenson // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2005. – Vol. 14. – P. 177–182. – DOI: 10.1361/10599630523737.
25. Филиппов М.А., Филиппенков А.А., Плотников Г.Н. Износостойкие стали для отливок. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. – 358 с. – ISBN 978-5-321-01473-8.
26. Heathcock C.J., Protheroe B.E., Ball A. Cavitation erosion of stainless steels // *Wear*. – 1982. – Vol. 81. – P. 311–327. – DOI: 10.1016/0043-1648(82)90278-2.
27. Understanding the roles of deformation-induced martensite of 304 stainless steel in different stages of cavitation erosion / L.M. Zhang, Z.X. Li, J.X. Hu, A.L. Ma, S. Zhang, E.F. Daniel, A.J. Umoh, H.X. Hu, Y.G. Zheng // *Tribology International*. – 2021. – Vol. 155. – P. 106752. – DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106752.
28. Лободюк В.А., Эстрин Э.И. Мартенситные превращения. – М.: Физматлит, 2009. – 350 с. – ISBN 978-5-9221-1018-1.
29. Structural features of welded joint of medium-carbon chromium steel containing metastable austenite / Yu.S. Korobov, O.V. Pimenova, M.A. Filippov, M.S. Khadyev, N.N. Ozerets, S.B. Mikhailov, S.O. Morozov, Yu.S. Davydov, N.M. Razikov // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2020. – Vol. 11. – P. 132–139. – DOI: 10.1134/S2075113320010220.
30. An influence of strain-induced nucleation of martensitic transformations on tribological properties of sprayed and surfaced depositions / Yu. Korobov, V. Verkhovubov, S. Nevezhin, M. Filippov, G.A. Tkachuk, A. Makarov, I. Zabolotskikh // *International Thermal Spray Conference and Exposition ITSC*. – Shanghai, China, 2016. – P. 694–699.
31. G 32-10. Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus. – ASTM, 2011. – 20 p. – (Annual Book of ASTM Standards).
32. Патент № 2710480 Российская Федерация. Установка для испытания на кавитационную эрозию: № 2018130210: заявл. 20.08.2018; опубл. 26.12.2019, Бюл. № 36 / В.И. Шумяков, Ю.С. Коробов, Х.Л. Алван, Н.В. Лежнин, А.В. Макаров, М.С. Девятьяров. – 9 с.
33. Enhanced cavitation erosion–corrosion resistance of high-velocity oxy-fuel-sprayed Ni-Cr-Al₂O₃ coatings through stationary friction processing / H.S. Arora, M. Rani, G. Perumal, H. Singh, H.S. Grewal // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2020. – Vol. 29. – P. 1183–1194. – DOI: 10.1007/s11666-020-01050-5.
34. Цветков Ю.Н., Горбаченко Е.О. Испытания сталей на кавитационное изнашивание с применением метода измерения профиля поверхности // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2017. – Т. 83, № 7. – С. 54–58.
35. Lipold J.C., Kotecki D.J. Welding metallurgy and weldability of stainless steels. – Hoboken, NJ: Wiley, 2005. – 357 p. – ISBN 0-471-47379-0.
36. Сварка и свариваемые материалы. В 3 т. Т. 1. Свариваемость материалов / под ред. Э.Л. Макарова. – М.: Металлургия, 1991. – 528 с. – ISBN 5-229-00816-4.
37. Understanding the roles of deformation-induced martensite of 304 stainless steel in different stages of cavitation erosion / L.M. Zhang, Z.X. Li, J.X. Hu, A.L. Ma, S. Zhang, E.F. Daniel, A.J. Umoh, H.X. Hu, Y.G. Zheng // *Tribology International*. – 2021. – Vol. 155. – P. 106752. – DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106752.
38. Santos L.L., Cardoso R.P., Brunatto S.F. Direct correlation between martensitic transformation and incubation-acceleration transition in solution-treated AISI 304 austenitic stainless steel cavitation // *Wear*. – 2020. – Vol. 462–463. – P. 203522. – DOI: 10.1016/j.wear.2020.203522.

Конфликт интересов

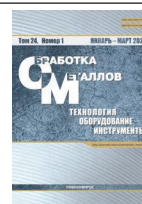
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Comparative study of cavitation erosion resistance of austenitic steels with different levels of metastability

Yury Korobov^{1, a, *}, Hussam Alwan^{2, b}, Aleksey Makarov^{1, c}, Vladimir Kukareko^{3, d}, Vitaliy Sirosh^{1, e},
 Michael Filippov^{2, f}, Svetlana Estemirova^{4, g}

¹ M.N. Miheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 18 S. Kovalevskoy str., Ekaterinburg, 620108, Russian Federation

² Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 19 Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation

³ The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, 12 Akademicheskaya str., Minsk, 220072, Republic of Belarus

⁴ Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 101 Amundsen str., Ekaterinburg, 620016, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0003-0553-918X>, yukorobov@gmail.com, ^b <https://orcid.org/0000-0002-2955-204X>, lefta.hussam@gmail.com,

^c <https://orcid.org/0000-0002-2228-0643>, av-mak@yandex.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0003-4283-871X>, v_kukareko@mail.ru,

^e <https://orcid.org/0000-0002-8180-9543>, sirosh.imp@yandex.ru, ^f <https://orcid.org/0000-0002-0733-4607>, filma1936@mail.ru,

^g <https://orcid.org/0000-0001-7039-1420>, esveta100@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 17 December 2021

Revised: 17 January 2022

Accepted: 28 January 2022

Available online: 15 March 2022

Keywords:

Cavitation erosion resistance

Metastable austenite

Martensitic phase transformation

Microstructure

Deposited coatings

Funding

The work was carried out within the framework of the state assignment of the IMF UB RAS on topics No. AAAA-A18-118020190116-6, No. AAAA-A19-119070490049-8. This study was supported by project No. IRA-SME-66316 "cladHEA +" under the M-ERA.NET program, Call 2019-II.

Acknowledgements

Research were partially conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials"

ABSTRACT

Introduction. Reliability-critical components of equipment working in contact with high-speed liquid media (for example, turbine blades of hydroelectric power stations, pump impellers, ship propellers) are subjected to one of the types of wear – cavitation erosion. **The current study aims** to select and scientifically substantiate the type of coating and its structural-phase state for the effective protection of parts from cavitation erosion. **Research methods.** The study carries out a comparative analysis of differences in the cavitation erosion resistance of characteristic austenitic steels, in the form of bulk material (316L) and coatings (E308L, 60Cr8TiAl), used for protection against cavitation Arc surfacing, i.e. MMA and MIG, is used for depositing the coatings. The tests are carried out on an original installation for evaluating the cavitation resistance of materials with applying ultrasound and the electrical potential difference. **Results and Discussion.** The results show that the 60Cr8TiAl has a higher resistance to cavitation erosion than that of E308L and 316L by 4 and 10 times, respectively. The structural factors that determine the resistance to cavitation erosion damage are identified to analyze the reasons for the differences in material resistance. Firstly, a strong dependence of the cavitation erosion resistance of austenitic steels on the intensity of the deformation martensitic transformation, developing under the influence of cavitation, is confirmed. This structural transformation contributes to an increase in cavitation resistance of the surface layer. In metastable austenitic steel, a deformation martensite (α') is formed in the surface layer during the initial test period. This causes an increase in hardness, dissipation of the energy of external action, and the appearance of compressive stresses that prevent the occurrence of microcracks. Subsequently, additional hardening of the previously formed dispersed crystals of α' -martensite occurs. In 60Cr8TiAl, these effects are significantly stronger than that of E308L and 316L due to the higher level of metastability of austenite and formation of carbon deformation martensite.

For citation: Korobov Yu.S., Alwan H.L., Makarov A.V., Kukareko V.A., Sirosh V.A., Filippov M.A., Estemirova S.Kh. Comparative study of cavitation erosion resistance of austenitic steels with different levels of metastability. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 1, pp. 61–72. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.1-61-72. (In Russian).

* Corresponding author

Korobov Yury S., D.Sc. (Engineering), Head of Laser/Plasma Processing Laboratory

M.N. Miheev Institute of Metal Physics,
 Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

18 S. Kovalevskoy str.,
 620108, Ekaterinburg, Russian Federation

Tel.: 8 (919) 379-20-16, e-mail: yukorobov@gmail.com

References

1. Bogachev I.N. *Kavitatsionnoe razrushenie i kavitatsionnostoikie splavy* [Cavitation destruction and cavitation-resistant alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1972. 192 p.
2. Singh R., Tiwari S.K., Mishra S.K. Cavitation erosion in hydraulic turbine components and mitigation by coatings: current status and future needs. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2012, vol. 21, pp. 1539–1551. DOI: 10.1007/s11665-011-0051-9.
3. Adamkowski A., Henke A., Lewandowski M. Resonance of torsional vibrations of centrifugal pump shafts due to cavitation erosion of pump impellers. *Engineering Failure Analysis*, 2016, vol. 70, pp. 56–72. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2016.07.011.
4. Gorbachenko E.O. *Otsenka dolgovechnosti metallicheskih materialov i sudovogo oborudovaniya pri kavitatsionnom iznashivanii metodom profilometrii*. Diss. kand. tekhn. nauk [Evaluation of the durability of metallic materials and ship equipment during cavitation wear by the profilometry method. PhD eng. sci. diss.]. St. Petersburg, 2019. 150 p.
5. Korobov Yu.S., Alwan H.L., Barbosa M., Lezhnin N.V., Soboleva N.N., Makarov A.V., Deviatyarov M.S., Davydov A.Yu. Soprotivlenie erozionno-korrozionnomu kavitatsionnomu vozdeistviyu WC–CoCr- i WC–NiCr-pokrytii, poluchennykh metodom HVOF [Cavitation erosion-corrosion resistance of WC–CoCr and WC–NiCr HVOF coatings]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroyeniye, materialovedeniye = Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 20–27. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.1.03.
6. Vyas B., Preece C. Cavitation erosion of face centered cubic metals. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1977, vol. 8, pp. 915–923. DOI: 10.1007/BF02661573.
7. Brujan E.A., Ikedab T., Matsumoto Y. Shock wave emission from a cloud of bubbles. *Soft Matter*, 2012, vol. 8, iss. 21, pp. 5777–5783. DOI: 10.1039/C2SM25379H.
8. Lauterborn W., Bolle H. Experimental investigation of cavitation bubble collapse in the neighborhood of a solid boundary. *Journal of Fluid Mechanics*, 1975, vol. 72, pp. 391–399. DOI: 10.1017/S0022112075003448.
9. Plesset M.S., Chapman R.B. Collapse of an initially spherical vapor cavity in the neighborhood of a solid boundary. *Journal of Fluid Mechanics*, 1971, vol. 47, pp. 283–290. DOI: 10.1017/S0022112071001058.
10. Dular M., Bachert B., Stoffel B., Širok B. Relationship between cavitation structures and cavitation damage. *Wear*, 2004, vol. 257, pp. 1176–11841. DOI: 10.1016/j.wear.2004.08.004.
11. Vyas B., Preece C. Stress produced in a solid by cavitation. *Journal of Applied Physics*, 1976, vol. 47, pp. 5133–5138. DOI: 10.1063/1.322584.
12. Pohl M., Stella J., Hessing C. Comparative study on CuZnAl and CuMnZnAlNiFe shape memory alloys subjected to cavitation-erosion. *Advanced Engineering Materials*, 2003, vol. 5, pp. 251–256. DOI: 10.1002/adem.200300341.
13. Espitia L.A., Toro A. Cavitation resistance, microstructure and surface topography of materials used for hydraulic components. *Tribology International*, 2010, vol. 43, pp. 2037–2045. DOI: 10.1016/j.triboint.2010.05.009.
14. Chiu K.Y., Cheng F.T., Man H.C. Cavitation erosion resistance of AISI 316L stainless steel laser surface-modified with NiTi. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, vol. 392, pp. 348–358. DOI: 10.1016/j.msea.2004.09.035.
15. Chen M., Liu H., Wang L., Xu Z., Ji V., Jiang C. Residual stress and microstructure evolutions of SAF 2507 duplex stainless steel after shot peening. *Applied Surface Science*, 2018, vol. 459, pp. 155–163. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.07.182.
16. Park I.-C., Kim S.-J. Effect of pH of the sulfuric acid bath on cavitation erosion behavior in natural seawater of electroless nickel plating coating. *Applied Surface Science*, 2019, vol. 483, pp. 194–204. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.03.277.
17. Alwan H.L., Korobov Yu.S., Soboleva N.N., Lezhnin N.V., Makarov A.V., Nikolaeva E.P., Deviatyarov M.S. Cavitation erosion-corrosion resistance of deposited austenitic stainless steel/E308L-17 electrode. *Solid State Phenomena*, 2020, vol. 299, pp. 908–913. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.908.
18. Gualco A., Svoboda H.G., Surian E.S. Effect of welding parameters on microstructure of Fe-based nanostructured weld overlay deposited through FCAW-S. *Welding International*, 2016, vol. 30, pp. 573–580. DOI: 10.1080/09507116.2015.1096533.

19. Sreedhar B.K., Albert S.K., Pandit A.B. Improving cavitation erosion resistance of austenitic stainless steel in liquid sodium by hardfacing – comparison of Ni and Co based deposits. *Wear*, 2015, vol. 342–343, pp. 92–99. DOI: 10.1016/j.wear.2015.08.009.
20. Matikainen V., Niemi K., Koivuluoto H., Vuoristo P. Abrasion, erosion and cavitation erosion wear properties of thermally sprayed alumina based coatings. *Coatings*, 2014, vol. 4, pp. 18–36. DOI: 10.3390/coatings4010018.
21. 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, pp. 1217–1230. DOI: 10.1007/s11666-016-0427-3.
22. Li J., Kannan R., Shi M., Li L. Solidified microstructure of wear-resistant Fe-Cr-C-B overlays. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2020, vol. 51, pp. 1291–1300. DOI: 10.1007/s11663-020-01863-3.
23. Tôn-Thât L. Experimental comparison of cavitation erosion rates of different steels used in hydraulic turbines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2010, vol. 12, pp. 1–9. DOI: 10.1088/1755-1315/12/1/012052.
24. Kumar A., Boy J., Zatorski R., Stephenson L.D. Thermal spray and weld repair alloys for the repair of cavitation damage in turbines and pumps: a technical note. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2005, vol. 14, pp. 177–182. DOI: 10.1361/10599630523737.
25. Filippov M.A., Filippenkov A.A., Plotnikov G.N. *Iznosostoikie stali dlya otlivok* [Wear-resistant steels for castings]. Ekaterinburg, UGTU-UI Publ., 2009. 358 p. ISBN 978-5-321-01473-8.
26. Heathcock C.J., Protheroe B.E., Ball A. Cavitation erosion of stainless steels. *Wear*, 1982, vol. 81, pp. 311–327. DOI: 10.1016/0043-1648(82)90278-2.
27. Zhang L.M., Li Z.X., Hu J.X., Ma A.L., Zhang S., Daniel E.F., Umoh A.J., Hu H.X., Zheng Y.G. Understanding the roles of deformation-induced martensite of 304 stainless steel in different stages of cavitation erosion. *Tribology International*, 2021, vol. 155, p. 106752. DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106752.
28. Lobodyuk V.A., Estrin E.I. *Martensitnye prevrashcheniya* [Martensitic transformations]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2016. 350 p. ISBN 978-5-9221-1018-1.
29. Korobov Yu.S., Pimenova O.V., Filippov M.A., Khadyev M.S., Ozerets N.N., Mikhailov S.B., Morozov S.O., Davydov Yu.S., Razikov N.M. Structural features of welded joint of medium-carbon chromium steel containing metastable austenite. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2020, vol. 11, pp. 132–139. DOI: 10.1134/S2075113320010220.
30. Korobov Yu., Verkhovubov V., Nevezhin S., Filippov M., Tkachuk G.A., Makarov A., Zabolotskikh I. An influence of strain-induced nucleation of martensitic transformations on tribological properties of sprayed and surfaced depositions. *International Thermal Spray Conference and Exposition ITSC*, Shanghai, China, 2016, pp. 694–699.
31. G 32-10. *Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus*. *Annual Book of ASTM Standards*. ASTM, 2011. 20 p.
32. Shumyakov V.I., Korobov Yu.S., Alvan Kh.L., Lezhnin N.V., Makarov A.V., Devyat'yarov M.S. *Ustanovka dlya ispytaniya na kavitatsionnuyu eroziyu* [Installation for cavitation erosion testing]. Patent RF, no. 2710480, 2019.
33. Arora H.S., Rani M., Perumal G., Singh H., Grewal H.S. Enhanced cavitation erosion–corrosion resistance of high-velocity oxy-fuel-sprayed Ni-Cr-Al₂O₃ coatings through stationary friction processing. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2020, vol. 29, pp. 1183–1194. DOI: 10.1007/s11666-020-01050-5.
34. Tsvetkov Yu.N., Gorbachenko E.O. Ispytaniya stalei na kavitatsionnoe iznashivanie s primeneniem metoda izmereniya profilya poverkhnosti [Profilometric measurements in accelerated testing of steels for cavitation wear]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 2017, vol. 83, no. 7, pp. 54–58.
35. Lipold J.C., Kotecki D.J. *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. Hoboken, NJ, Wiley, 2005. 357 p. ISBN 0-471-47379-0.
36. Makarov E.L., ed. *Svarka i svarivaemye materialy*. V 3 t. T. 1. *Svarivaemost' materialov* [Welding and materials to be welded. In 3 vol. Vol. 1. Weldability of materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1991. 528 p. ISBN 5-229-00816-4.

37. Zhang L.M., Li Z.X., Hu J.X., Ma A.L., Zhang S., Daniel E.F., Umoh A.J., Hu H.X., Zheng Y.G. Understanding the roles of deformation-induced martensite of 304 stainless steel in different stages of cavitation erosion. *Tribology International*, 2021, vol. 155, p. 106752. DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106752.

38. Santos L.L., Cardoso R.P., Brunatto S.F. Direct correlation between martensitic transformation and incubation-acceleration transition in solution-treated AISI 304 austenitic stainless steel cavitation. *Wear*, 2020, vol. 462–463, p. 203522. DOI: 10.1016/j.wear.2020.203522.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2022 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).