

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 Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 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. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 33–41. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.4.05

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 22, № 4, 2020
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2020.4.05

УДК 621.793:620.181

**Ю.С. Коробов^{1,2}, Х.Л. Алван^{2,3}, М.А. Филиппов², В.И. Шумяков²,
Н.Н. Соболева^{2,4}, В.А. Сирош¹, С.Х. Эстемирова^{2,5}, А.В. Макаров^{1,2,4}**

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

²Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия

³Технологический университет, Багдад, Ирак

⁴Институт машиноведения Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

⁵Институт металлургии Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

**СРАВНЕНИЕ КАВИТАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА
СО СТРУКТУРОЙ МЕТАСТАБИЛЬНОГО И СТАБИЛЬНОГО АУСТЕНИТА**

Детали машин, работающие в движущихся жидких средах, например гидравлическое оборудование, подвергаются кавитационной эрозии. Типовым решением для защиты против этого воздействия является применение стабильно-аустенитных сталей, отличающихся высокой пластичностью, например 316L. Это позволяет противостоять ударному воздействию при разрыве жидкости в приповерхностной области. Метастабильный аустенит является перспективным материалом для этой области применения. Он сочетает пластичность с упрочнением в случае приложения внешних нагрузок высокого уровня. В данном исследовании стойкость против кавитационной эрозии наплавленного слоя со структурой метастабильного аустенита вида 8,0Cr–0,6C–1,5Al–Ti и стабильно-аустенитной стали 18Cr10Ni₂Mo (далее AISI 316L) оценивали с использованием разработанной ультразвуковой испытательной установки. Наплавку порошковой проволоки диаметром 1,6 мм из стали 8,0Cr–0,6C–1,5Al–Ti выполнили на подложку из стали AISI 316L сваркой вольфрамовым электродом в среде инертного газа. Критерий потери массы материала был использован для оценки стойкости образцов. Результаты испытаний на кавитацию показали, что образец с наплавленным слоем показал примерно в 10 раз более высокое сопротивление кавитационной эрозии, чем сталь AISI 316L. Исследования поверхности образцов с применением оптического микроскопа и сканирующей электронной микроскопии показали, что наплавленный слой был значительно меньше подвержен износу по сравнению со сталью AISI 316L. Показано, что хорошее сопротивление кавитации наплавленного слоя связано с деформационным мартенситным превращением, происходящим в процессе кавитационного нагружения. Таким образом, нанесение наплавленных слоев из стали 8,0Cr–0,6C–1,5Al–Ti может эффективно увеличивать стойкость против кавитационной эрозии деталей, изготовленных из стали AISI 316L.

Ключевые слова: кавитационная эрозия, кавитационная стойкость, кавитационное разрушение, ультразвуковое кавитационное испытание, метастабильные аустенитные стали, сталь AISI 316L, мартенситное фазовое превращение, микроструктура, изношенные поверхности, топография поверхности.

Yu.S. Korobov^{1,2}, H.L. Alwan^{1,3}, M.A. Filippov², V.I. Shumyakov²,
N.N. Soboleva^{2,4}, V.A. Sirosh¹, S.H. Estemirova^{2,5}, A.V. Makarov^{1,2,4}

¹Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the RAS named after M.N. Miheev
Yekaterinburg, Russian Federation

²Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation

³University of Technology, Baghdad, Iraq

⁴Institute of Engineering Science of the Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg, Russian Federation

⁵Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg, Russian Federation

COMPARATIVE STUDY ON CAVITATION RESISTANCE OF DEPOSITED METAL WITH METASTABLE STRUCTURE AND STABLE AUSTENITE

Machine parts operating in moving fluids, such as hydraulic equipment, are subjected to cavitation erosion. Stable austenitic steels such as 316L with high ductility are used in manufacturing such type of equipment. This provides the possibility to resist the impact of fluid rupture near the surface region. Metastable austenite is a promising material for this application. It combines ductility with hardening in case of high external loads. In this study, the resistance to cavitation erosion of the deposited layer with metastable austenite the structure type 8.0Cr-0.6C-1.5Al-Ti and stable austenitic steel 18Cr10Ni2Mo (hereinafter AISI 316L) was evaluated using a developed ultrasonic testing apparatus. A flux-cored wire of 1.6 mm in diameter made of 8.0Cr-0.6C-1.5Al-Ti steel was deposited on a substrate made of AISI 316L steel by gas tungsten arc welding. The material weight loss criterion was used to evaluate the cavitation resistance of specimens. The results of the cavitation tests revealed that the specimen with the deposited layer was exhibited about 10 times higher resistance to cavitation erosion than the AISI 316L steel. Examination of the specimen's surface using an optical microscope and scanning electron microscopy showed that the deposited layer was significantly less damaged by cavitation compared to AISI 316L steel. The good resistance to cavitation of the deposited layer might be attributed to deformation martensitic transformation occurring during cavitation loading. Thus, applying the deposited layers of steel 8.0Cr-0.6C-1.5Al-Ti can effectively increase the resistance to cavitation erosion of parts made of AISI 316L steel.

Keywords: cavitation erosion, cavitation resistance, cavitation damage, ultrasonic cavitation testing, metastable austenitic steels, AISI 316L steel, martensitic phase transformation, microstructure, eroded surfaces, surface topography.

Введение

Разрушение деталей машин во многих случаях начинается с поверхностных слоев. Детали машин, работающие в контакте с жидкостью, такие как гидротурбины, клапаны, крыльчатки насосов и корабельные винты, подвергаются своеобразному разрушению поверхностных слоев – кавитационной эрозии. Эрозия поверхностных слоев снижает эффективность и долговечность деталей машин [1, 2]. Источником разрушения является многократный разрыв жидкости вблизи поверхности детали. Разрыв жидкости вызывает ударные волны и высокоскоростные микроструи. Такое воздействие разрыва жидкости приводит к износу поверхности металла и образованию мелких полостей [3–5]. Величина давления за счет кавитационного воздействия может превышать 1500 МПа [6, 7], а скорость микроструй жидкости превышает 120 м/с [8–10]. Таким образом, кавитационно-эрозионное разрушение возникает из-за циклического кавитационного нагружения, которое приводит к пластической деформации и образованию усталостных трещин на поверхности детали и в конечном итоге к удалению материала [11, 12].

Стабильно-аустенитные стали широко используются для защиты против кавитации, например в гидравлическом оборудовании. Одной из наиболее эффективных в этом отношении является сталь AISI 316L [13]. Нанесение защитных слоев наплавкой/напылением является важным способом повышения стойкости деталей против кавитацион-

ной эрозии [14, 15]. В качестве наплавочных материалов для получения слоев, стойких против кавитации, перспективно применение сталей со структурой метастабильного аустенита (МСА). В этих сталях при интенсивном нагружении реализуется синергетический микротрип-эффект вследствие «мартенситной сверхпластичности» в момент протекания регулируемого мартенситного превращения при охлаждении сварных швов или в процессе приложения значительных внешних нагрузок [16, 17]. Это сопровождается следующими синергетическими эффектами:

- рост твердости вследствие увеличения доли мартенситной фазы в структуре;
- релаксация микронапряжений в поверхностных слоях, поскольку энергия внешней нагрузки, которая воздействует на поверхность, рассеивается вследствие микротрип-эффекта деформационного превращения метастабильного аустенита в мартенсит в процессе испытания или эксплуатации;
- снижение напряжений в сварном шве вследствие структурных превращений.

Вследствие указанных эффектов у металла с МСА-структурой, подвергающегося внешним воздействиям, наблюдается значительное повышение свойств за счет реализации внутреннего ресурса самого материала. При этом мартенситное превращение происходит с крайне высокой скоростью – порядка 10^{-7} с [18]. Это быстрее примерно на порядок, чем время самых динамичных внешних механических воздействий.

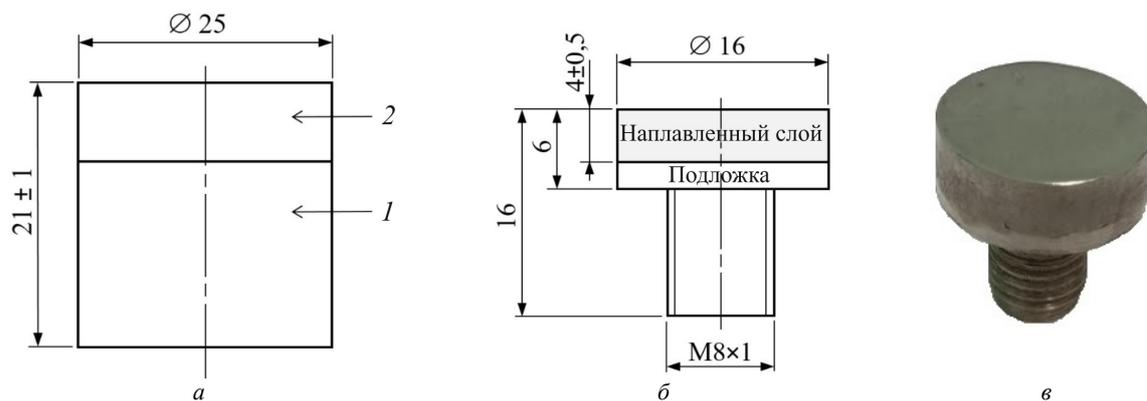


Рис. 1. Подготовка образца для кавитационных испытаний: а – подготовка наплавленного слоя (1 – подложка, сталь AISI 316L; 2 – наплавленный слой, 8,0Cr–0,6C–1,5Al–Ti; выполнен в три прохода); б – чертеж образца; в – фото испытываемого образца

Оценка внешних нагрузок, соответствующих началу образования мартенсита деформации в метастабильно-аустенитной стали 50Н9Х5, показала, что значение порогового уровня увеличивается от 1000 до 2500 МПа при увеличении исходного количества мартенсита от 15 до 75 %. При напряжениях, превышающих пороговое значение, количество деформационного мартенсита линейно возрастает с ростом напряжений [19]. Этот уровень нагрузок соответствует значениям давления, возникающего при кавитации, более 1500 МПа, как показано ранее. Метастабильные аустенитные стали (МАС) являются подходящими материалами, выдерживающими различные механические нагрузки [20]. Некоторые сплавы на основе Fe, такие как Fe–Cr–C [21], Fe–Mn–Cr–Si [22] и Fe–Cr–Ni–C [23], эффективно используются в различных областях применения для уменьшения кавитационного разрушения.

Применение разработанных авторами экономнолегированных порошковых проволок базовой системы легирования Fe–Cr–C позволяет получать сваркой/наплавкой/напылением защитные слои с МСА-структурой, которые успешно противостоят механическим нагрузкам высокого уровня [20, 24].

Целью данного исследования является сравнение стойкости против кавитационной эрозии стали AISI 316L и наплавленного слоя метастабильной стали 8,0Cr–0,6C–1,5Al–Ti.

Методика

Материалы и процесс

Образцы для кавитационных испытаний были подготовлены из стали 316L (химический состав, мас. %, по данным изготовителя: C ≤ 0,03; Cr – 16,5...18,0; Ni – 10,0...13,0; Mo – 2,0...2,5; Mn ≤ 0,03; P ≤ 0,045; S ≤ 0,03; N ≤ 0,1; остальное Fe) без наплавки и с наплавкой порошковой проволокой

Ø1,6 мм из метастабильной аустенитной стали (химический состав, мас. %, по данным изготовителя: C – 0,6; Cr – 8,0; Al – 1,5; Ti – 1,0; остальное Fe). Размеры образцов соответствовали требованиям стандарта ASTM G32–10 по испытаниям на кавитационную эрозию¹. Вид образцов для испытаний представлен на рис. 1. Наплавку выполняли сваркой вольфрамовым электродом в среде инертного газа (TIG), установка Шторм-LORCH («Шторм», Россия), на подложке из стали AISI 316L. Наплавку проводили при токе 90–110 А, напряжении 12 В и скорости подачи аргона 12–15 л/мин. Поверхности шлифовали наждачной бумагой, алмазной пастой и электролитическим травлением в 10 % CrO₃ при 1 В в течение 10 с (для стали AISI 316L) и в H₃PO₄ + Cr₃O при 4 В и 2 А в течение 60 с (для наплавленного слоя из стали 8,0Cr–0,6C–1,5Al–Ti). После наплавки образцы шлифовали до толщины слоя 4 ± 0,5 мм. Изношенные поверхности исследуемых образцов наблюдали с помощью оптического микроскопа Alltami MET 1C (Россия) и сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA II XMU (SEM) (Tescan, Чехия). Рентгеноструктурный анализ (РСА) выполнен с помощью дифрактометра Shimadzu XRD-7000 (Shimadzu, Япония). Условия съемки: излучение – CuK_α, графитовый монохроматор, угловой диапазон 2θ = 30°...115°, тип съемки – пошаговый, шаг сканирования – 0,04°, экспозиция – 3 с.

Кавитационные испытания

Для оценки кавитационной эрозии образцов использовали оригинальную установку (рис. 2).

¹ G 32-10 Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus // Annual Book of ASTM Standards / ASTM. 2011. P. 1–19.

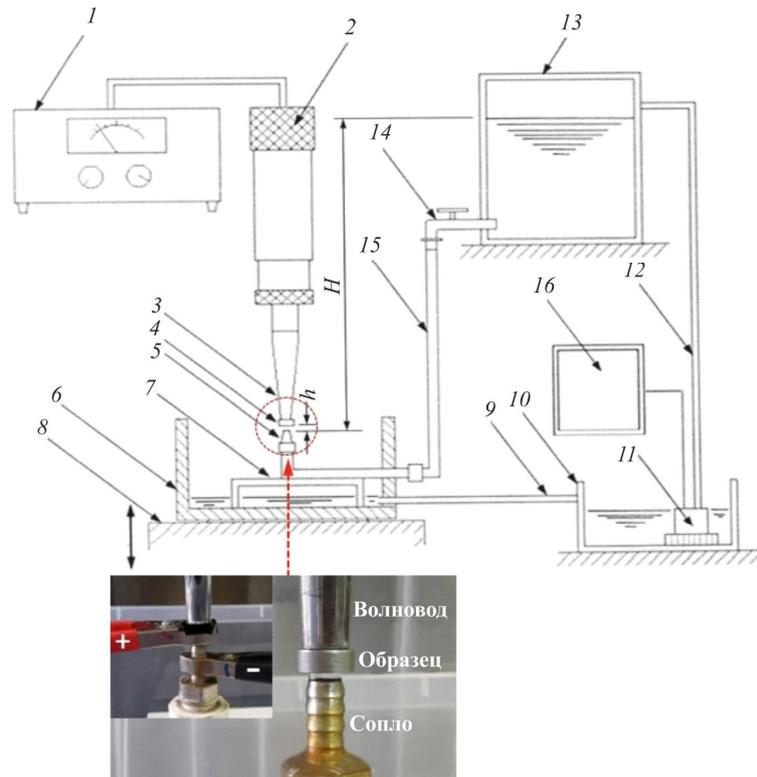


Рис. 2. Схема разработанной установки для испытаний на кавитацию [25]: 1 – ультразвуковой генератор; 2 – ультразвуковой преобразователь; 3 – зонд (волновод); 4 – испытуемый образец; 5 – сопло; 6 – контейнер; 7 – основание; 8 – подвижный стол; 9, 12, 15 – шланги; 10 – накопительный контейнер для жидкости; 11 – насос; 13 – напорный бак рабочей жидкости; 14 – клапан управления потоком жидкости; 16 – контроллер; h – зазор (1–3 мм); H – высота бака (~1 м)

Испытания проводили в водной среде с применением ультразвукового генератора мощностью 500 Вт, частотой $20 \pm 0,1$ кГц и амплитудой 55 ± 3 мкм, на образец подавали напряжение 12 В для ускорения кавитационных испытаний. Общее время испытания на кавитационную стойкость составило 300 мин с разделением на несколько периодов. Износ оценивали по потере массы образцов с помощью аналитических весов ВЛР-200 с погрешностью 0,5 мг. Перед каждым взвешиванием образцы промывали в ацетоне и сушили горячим воздухом в течение 30 с.

Результаты и обсуждение

Кавитационная стойкость

Измерение износа показало, что стойкость против кавитационной эрозии у наплавленного слоя примерно в 10 раз выше, чем у стали AISI 316L (рис. 3).

Изучение поверхности до испытания на кавитацию

Анализ причин различия стойкости против кавитационной эрозии был выполнен на основе

изучения структуры и фазового состава изучаемых материалов. На рис. 4 показана структура стали AISI 316L (см. рис. 4, а) и наплавленного слоя метастабильной стали 8,0Cr–0,6C–1,5Al–Ti (см. рис. 4, б).

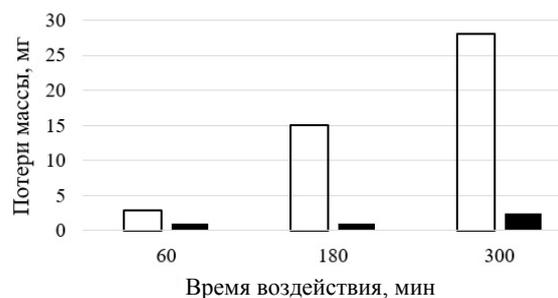


Рис. 3. Стойкость против кавитационной эрозии стали AISI 316L и наплавленного слоя стали 8,0Cr–0,6C–1,5Al–Ti: □ сталь AISI 316L; ■ наплавленный слой

Результаты РСА показали, что в исходном состоянии образцы имели преимущественно аустенитную структуру (структура стали 316 состояла из аустенита (γ -Fe 97,4 %) и мартенсита (α -Fe 2,6 %), а образец стали 8,0Cr–0,6C–1,5Al–Ti имел структуру 69 % аустенита и 31 % мартенсита и небольшое количество карбидов ($M_2C + M_{23}C_6$) ~ 3 %).

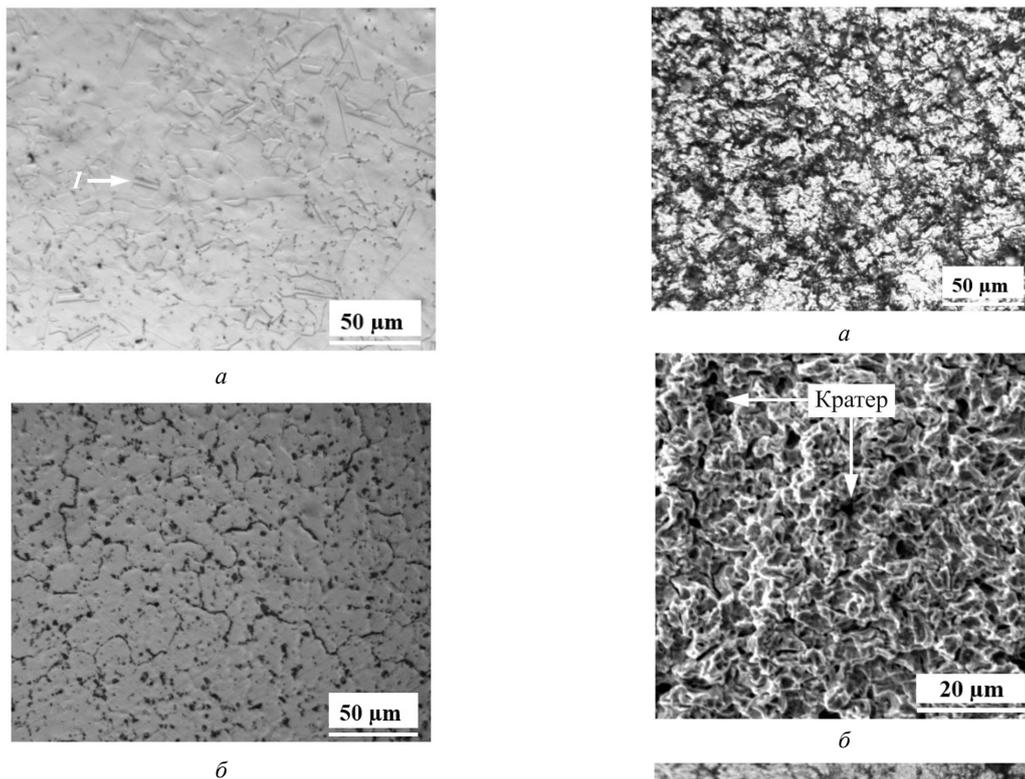


Рис. 4. Оптические изображения структуры поверхности образцов: *a* – сталь AISI 316L (*l* – двойники отжига); *б* – наплавленный слой из стали 8,0Cr–0,6C–1,5Al–Ti

**Изучение поверхности
после испытания на кавитацию**

На рис. 5 показаны LOM/SEM-изображения изношенных поверхностей для стали AISI 316L (см. рис. 5, *a*, *б*) и наплавленного слоя из стали 8,0Cr–0,6C–1,5Al–Ti (см. рис. 5, *в*, *г*). Сравнение результатов оптических изображений до и после 60 мин кавитационного воздействия стали AISI 316L (см. рис. 4, *a*, рис. 5, *a*) показало, что, если в исходном состоянии образец имел однородную структуру поверхности, состоящую из полиэдрических зерен аустенита с двойниками отжига, в процессе кавитации начиналась эрозия на границах зерен, представляющих слабые места в структуре, и поверхность образца становилась более шероховатой (см. рис. 5, *a*). После завершения испытаний (300 мин) на поверхности не осталось неизношенных участков (см. рис. 5, *б*). Это соответствует известным результатам, указывающим, что пластичные материалы обладают способностью подвергаться локальной пластической деформации в виде усталостного разрушения под действием кавитации [26]. По оптическому изображению поверхности наплавленного слоя стали 8,0Cr–0,6C–1,5Al–Ti после испытаний (см. рис. 5, *в*) хорошо видно, что поверхность была менее повреждена по сравнению с поверхностью исходного образца (см. рис. 4, *б*).

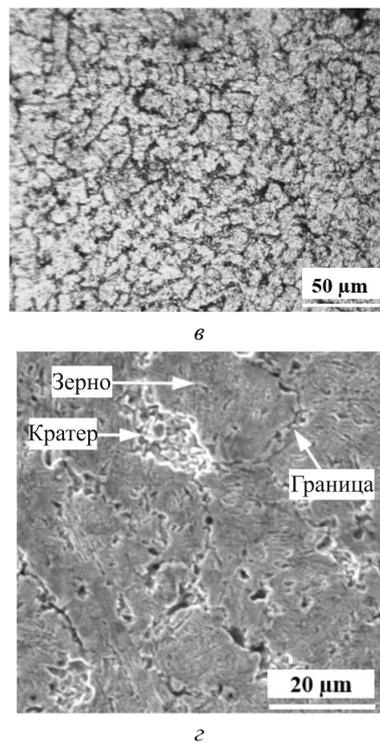


Рис. 5. Изношенные поверхности образцов, наблюдаемые после кавитации с помощью LOM (*a*, *в*) и SEM (*б*, *г*) для стали AISI 316L (*a* – 60 мин; *б* – 300 мин) и наплавленного слоя стали 8,0Cr–0,6C–1,5Al–Ti (*в*, *г* – 300 мин)

Это свидетельствует о более высокой стойкости против кавитационной эрозии по сравнению со сталью AISI 316L. Для оценки состояния поверхности двух образцов после кавитационных испытаний SEM-изображения показывают, что вся по-

верхность стали AISI 316L была разрушена и на поверхности отчетливо видны кратеры с тонкими перемычками между ними (см. рис. 5, б), в то время как на поверхности образца стали 8,0Cr–0,6C–1,5Al–Ti зерна и их границы можно легко распознать, поверхность была значительно менее разрушена и на ней присутствуют только отдельные кратеры (см. рис. 5, з).

Превосходное сопротивление кавитационной эрозии наплавленного слоя стали 8,0Cr–0,6C–1,5Al–Ti можно объяснить тем, что фазовое превращение метастабильной аустенитной стали (γ - α), происходящее во время воздействия процесса кавитации, приводит к повышению прочности поверхности металла по сравнению со сталью AISI 316L. Сравнение результатов РСА до и после кавитационного воздействия показало, что в процессе кавитационного воздействия большая часть аустенита при микроударном нагружении на рабочей поверхности превратилась в мартенсит (в сумме количество мартенсита охлаждения и мартенсита деформации составило 73 %, при сохранении 23 % остаточного аустенита), что способствовало увеличению степени упрочнения рабочей поверхности образцов. Это приводит к улучшению поверхностных свойств материала из-за образования мартенсита в микрообъемах рабочей поверхности при микроударном кавитационном нагружении [26, 27].

Результаты исследования показывают, что при кавитационном воздействии на наплавленный металл из стали 8,0Cr–0,6C–1,5Al–Ti уровень удельных нагрузок достаточен для образования мартенсита деформации. Протекающие синергетические эффекты позволяют данной стали противостоять этому виду изнашивания значительно лучше в сравнении с характерным материалом для кавитационностойких применений – аустенитной сталью 316L.

Выводы

1. Стойкость против кавитационной эрозии наплавленных слоев из порошковой проволоки вида 8,0Cr–0,6C–1,5Al–Ti на порядок выше по сравнению со сталью AISI 316L.

2. Исследования показали, что высокая кавитационная стойкость наплавленных слоев из порошковой проволоки вида 8,0Cr–0,6C–1,5Al–Ti обусловлена формированием структуры метастабильного аустенита, который при кавитационном воздействии преобразуется в мартенсит деформации. Последний вследствие синергетических эффектов успешно противостоит кавитационной эрозии.

Список литературы

1. Богачев И.Н. Кавитационное разрушение и кавитационностойкие сплавы. – М.: Металлургия, 1972. – 192 с.
2. Kumar P., Saini R.P. Study of cavitation in hydro turbines: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2010. – Vol. 14. – P. 374–383.
3. 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.
4. 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. – P. 299–338.
5. Pereira F., Avellan F., Dupont P. Prediction of cavitation erosion: an energy approach // *Journal of Fluids Engineering*. – 1998. – Vol. 120. – P. 719–727.
6. Brujan E.A., Ikedab T., Matsumoto Y. Shock Wave Emission from a Cloud of Bubbles // *Soft Matter*. – 2012. – Vol. 8, no. 21. – P. 5777–5783.
7. Philipp A., Lauterborn W. Cavitation erosion by single laser-produced bubbles // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1998. – Vol. 361. – P. 75–116.
8. 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.
9. 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.
10. Relationship between cavitation structures and cavitation damage / M. Dular, B. Bachert, B. Stoffel, B. Širok // *Wear*. – 2004. – Vol. 257. – P. 1176–1184.
11. Ahmed S.M., Hokkirigawa K., Oba R. Fatigue failure of SUS 304 caused by vibratory cavitation erosion // *Wear*. – 1994. – Vol. 177. – P. 129–137.
12. Hattori S., Mikami N. Cavitation erosion resistance of stellite alloy weld overlays // *Wear*. – 2009. – Vol. 267, no. 11. – P. 1954–1960.
13. Improvement in cavitation erosion resistance of AISI 316L stainless steel by friction stir processing / M. Hajian, A. Abdollah-zadeh, S.S. Rezaei-Nejad, H. Assadi, S.M.M. Hadavi, K. Chung, M. Shokouhimehr // *Applied Surface Science*. – 2014. – Vol. 308. – P. 184–192.
14. Wang Z., Zhu J. Cavitation erosion of Fe–Mn–Si–Cr shape memory alloys // *Wear*. – 2004. – Vol. 256. – P. 66–72.
15. 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

16. Стойкость наплавленных слоев и напыленных покрытий со структурой метастабильного аустенита против абразивного и адгезионного изнашивания / Ю.С. Коробов, М.А. Филиппов, А.В. Макаров, В.С. Верхорубов, С.В. Невежин, А.М. Кашфуллин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т. 17, № 2. – С. 224–230.

17. Повышение абразивной износостойкости низколегированных сталей за счет получения в их структуре наряду с другими составляющими остаточного метастабильного аустенита и реализация эффекта самозакалки при нагружении / Л.С. Малинов, В.Л. Малинов, Д.В. Бурова, В.В. Аниченков // Материаловедение. – 2015. – № 2. – С. 27–30.

18. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с

19. Эстрин Э.И., Лободюк В.А. Мартенситные превращения. – М.: Литрес, 2016. – 350 с.

20. An influence of strain-induced nucleation of martensitic transformations on tribological properties of sprayed and surfaced depositions / Yu. Korobov, V. Verkhorubov, S. Nevezhin, M. Filippov, G.A. Tkachuk, A. Makarov, I. Zabolotskikh // International Thermal Spray Conference and Exposition ITSC 2016. – Shanghai, China, 2016. – P. 694–699.

21. Study on the cavitation erosion behavior of hardfacing alloys for nuclear power industry / M.-W. Lee, Y.-K. Kim, Y.-M. Oh, Y. Kim, S.-H. Lee, H.-S. Hong, S.-J. Kim // Wear. – 2003. – Vol. 255. – P. 157–161.

22. Wang Z., Zhu J. Effect of phase transformation on cavitation erosion resistance of some ferrous alloys // Materials Science and Engineering A. – 2003. – Vol. 358. – P. 273–278.

23. Effects of strain induced martensitic transformation on the cavitation erosion resistance and incubation time of Fe–Cr–Ni–C alloys / M.C. Park, K.N. Kim, G.S. Shin, S.J. Kim // Wear. – 2012. – Vol. 274–275. – P. 28–33.

24. 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, no. 1. – P. 132–139. DOI.org/10.1134/S2075113320010220

25. Установка для испытаний на кавитационную эрозию: пат. 2710480 Рос. Федерация / Шумяков В.И., Коробов Ю.С., Алван Х.Л., Лезнин Н.В., Макаров А.В., Девятъяров М.С. – № 2018130210; заявл. 20.08.2018; опубл. 26.12.2019, Бюл. № 36.

26. Филиппов М.А., Литвинов В.С., Немировский Ю.Р. Стали с метастабильным аустенитом. – М.: Металлургия, 1988. – 255 с.

27. Rodríguez-Martínez J.A., Pescib R., Rusinek A. Experimental study on the martensitic transformation in AISI 304 steel sheets subjected to tension under wide ranges of strain rate at room temperature // Materials Science and Engineering A. – 2011. – Vol. 528. – P. 5974–5982.

References

1. Bogachev I.N. Kavitatsionnoe razrushenie i kavitatsionnostoikie splavy [Cavitation Fracture and Cavitation Resistant Alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1972, 192 p.

2. Kumar P., Saini R.P. Study of cavitation in hydro turbines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, vol. 14, pp. 374–383.

3. 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.

4. 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.

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

6. Brujan E.A., Ikedab T., Matsumoto Y. Shock Wave Emission from a Cloud of Bubbles. *Soft Matter.*, 2012, vol. 8, no. 21, pp. 5777–5783.

7. Philipp A., Lauterborn W. Cavitation erosion by single laser-produced bubbles. *Journal of Fluid Mechanics*, 1998, vol. 361, pp. 75–116.

8. 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.

9. 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.

10. Dular M., Bachert B., Stoffel B., Širok B. Relationship between cavitation structures and cavitation damage. *Wear.*, 2004, vol. 257, pp. 1176–1184.

11. Ahmed S.M., Hokkirigawa K., Oba R. Fatigue failure of SUS 304 caused by vibratory cavitation erosion. *Wear.*, 1994, vol. 177, pp. 129–137.

12. Hattori S., Mikami N. Cavitation erosion resistance of stellite alloy weld overlays. *Wear.*, 2009, vol. 267, no. 11, pp. 1954–1960.

13. Hajian M., Abdollahzadeh A., Rezaei-Nejad S.S., Assadi H., Hadavi S.M.M., Chung K., Shokouhimehr M. Improvement in cavitation erosion resistance of AISI 316L stainless steel by friction stir processing. *Applied Surface Science*, 2014, vol. 308, pp. 184–192.

14. Wang Z., Zhu J. Cavitation erosion of Fe–Mn–Si–Cr shape memory alloys. *Wear.*, 2004, vol. 256, pp. 66–72.

15. Korobov Yu.S., Alwan Kh.L., Barboza M., Lezhnin N.V., Soboleva N.N., Makarov A.V., Deviat'iarov M.S., Davydov A.Iu. Soprotivlenie erozionno-korrozionnomu kavitatsionnomu vozdeistviyu WC–CoCr- i WC–NiCr-pokrytii, poluchennykh metodom HVOF [Resistance to erosion-corrosion cavitation effect of WC–CoCr- and WC–NiCr coatings obtained by HVOF method]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 20–27. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.1.03

16. Korobov Iu.S., Filippov M.A., Makarov A.V., Verkhorubov V.S., Nevezhin S.V., Kashfullin A.M. Stoikost' naplavlennykh sloev i napylennykh pokrytii so strukturoi metastabil'nogo austenita protiv abrazivnogo i adgezionnogo iznashivaniia [Metastable austenite metastable layer and sprayed coating resistance to abrasive and adhesive wear and tear]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2015, vol. 17, no. 2, pp. 224–230.

17. Malinov L.S., Malinov V.L., Burova D.V., Anichenkov V.V. Povyshenie abrazivnoi iznosostoikosti nizkolegированных сталей за счет получения в их структуре наряду с другими составляющими остаточного metastabil'nogo austenita i realizatsiia effekta samozakalki pri nagruzhении [Increase of abrasion resistance of low-alloy steels due to obtaining in their structure along with other components of residual metastable austenite and realization of self-hardening effect under loading]. *Materialovedenie*, 2015, no. 2, pp. 27–30.

18. Guliaev A.P. *Metallovedenie [Metal Science]*. Moscow: Metallurgii, 1986, 544 p.

19. Estrin E.I., Lobodiuk V.A. *Martensitnye prevrascheniia [Martensitic Transformations]*. Moscow: Litres, 2016, 350 p.

20. Korobov Yu., Verkhorubov 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 2016. Shanghai, China*, 2016, pp. 694–699.

21. Lee M.-W., Kim Y.-K., Oh Y.-M., Kim Y., Lee S.-H., Hong H.-S., Kim S.-J. Study on the cavitation erosion behavior of hardfacing alloys for nuclear power industry. *Wear.*, 2003, vol. 255, pp. 157–161.

22. Wang Z., Zhu J. Effect of phase transformation on cavitation erosion resistance of some ferrous alloys. *Materials Science and Engineering A.*, 2003, vol. 358, pp. 273–278.

23. Park M.C., Kim K.N., Shin G.S., Kim S.J. Effects of strain induced martensitic transformation on the cavitation erosion resistance and incubation time of Fe–Cr–Ni–C alloys. *Wear.*, 2012, vol. 274–275, pp. 28–33.

24. 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, no. 1, pp. 132–139. DOI.org/10.1134/S2075113320010220

25. Shumiakov V.I., Korobov Iu.S., Alvan Kh.L., Lezhnin N.V., Makarov A.V., Deviat'iarov M.S. Ustanovka dlia ispytaniia na kavitatsionnuu eroziuu: pat. 2710480 Ros. Federatsiia [Cavitation erosion test rig]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2018130210 (2019).

26. Filippov M.A., Litvinov V.S., Nemirovskii Iu.R. Stali s metastabil'nym austenitom [Steels with metastable austenite]. Moscow: Metallurgii, 1988, 255 p.

27. Rodríguez-Martínez J.A., Pescib R., Rusinek A. Experimental study on the martensitic transformation in AISI 304 steel sheets subjected to tension under wide ranges of strain rate at room temperature. *Materials Science and Engineering A.*, 2011, vol. 528, pp. 5974–5982.

Получено 04.11.2020

Опубликовано 10.12.2020

Сведения об авторах

Коробов Юрий Станиславович (Екатеринбург, Россия) – доктор технических наук, главный научный сотрудник, завлабораторией лазерной и плазменной обработки Института физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения РАН; профессор кафедры технологии сварочного производства Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, e-mail: yukorobov@gmail.com.

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

Филиппов Михаил Александрович (Екатеринбург, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры металловедения Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, e-mail: filma1936@mail.ru.

Шумяков Валентин Иванович (Екатеринбург, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии сварочного производства Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, e-mail: val29071@yandex.ru.

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

Сирош Виталий Александрович (Екатеринбург, Россия) – научный сотрудник лаборатории механических свойств Института физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения РАН, e-mail: sirosh.imp@yandex.ru.

Эстемирова Светлана Хусановна (Екатеринбург, Россия) – кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории аналитической химии Института металлургии Уральского отделения РАН, e-mail: esveta100@mail.ru.

Макаров Алексей Викторович (Екатеринбург, Россия) – доктор технических наук, завотделом материаловедения и лабораторией механических свойств Института физики металлов им. М.Н. Михеева; 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.

About the authors

Yury S. Korobov (Yekaterinburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher Scientist, Head of the Laboratory for Laser and Plasma Processing, Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the RAS named after M.N. Miheev; Professor,

Department of Welding Technology and Production, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, e-mail: yukorobov@gmail.com.

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

Michail A. Filippov (Yekaterinburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Material Science, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Department of Production Engineering and Metallurgy, University of Technology, e-mail: filma1936@mail.ru.

Valentin I. Shymiakov (Yekaterinburg, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding Technology and Production, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, e-mail: val29071@yandex.ru.

Natalia N. Soboleva (Yekaterinburg, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Senior Researcher, Institute of Engineering Science of the Ural Branch of the RAS;

Associate Professor; Department of Welding Technology and Production, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, e-mail: natashasoboleva@list.ru.

Vitalii A. Sirosh (Yekaterinburg, Russian Federation) – Researcher, Laboratory of Mechanical Properties, Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the RAS named after M.N. Miheev, e-mail: sirosh.imp@yandex.ru.

Svetlana H. Estemirova (Yekaterinburg, Russian Federation) – Ph.D. in Chemistry Science, Senior Researcher, Laboratory of Analytical Chemistry, Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the RAS, e-mail: esveta100@mail.ru.

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