ISSN: 0368–0797. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2019. Том 62. № 1. С. 49 – 56.
© 2019. *Капуткина Л.М., Свяжин А.Г., Смарыгина И.В., Киндоп В.Э.*

УДК 669.786:620.193:669.14.018.8

КОРРОЗИОННАЯ И КАВИТАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ В МОРСКОЙ ВОДЕ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЗОТИСТЫХ ХРОМОНИКЕЛЬМАРГАНЦЕВЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ*

Капуткина Л.М., *д.ф.-м.н, профессор, главный научный сотрудник кафедры обработки металлов давлением* (kaputkina@mail.ru)
Свяжин А.Г., *д.т.н., профессор, главный научный сотрудник кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов*
Смарыгина И.В., *к.т.н., доцент кафедры пластической деформации специальных сплавов*
Киндоп В.Э., *к.т.н., старший научный сотрудник, зам. начальника управления науки*

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

Аннотация. Экспериментально исследована коррозионная и кавитационная стойкость в морской воде высокопрочных экономнолегированных азотистых хромоникельмарганцевых сталей 10Х19Г10Н6АМ2 и 09Х19Г10Н6АМ2Д2 в сравнении с хромоникелевыми сталями 04Х18Н9 и 04Х18АН9. Испытания на стойкость к питтинговой коррозии осуществляли химическим методом в тестовом растворе 100 г/л $FeCl_3 \cdot 6H_2O$. Стойкость к общей коррозии оценивали испытаниями в синтетической морской воде (3 % NaCl). Испытание на кавитационную стойкость в морской воде проводили с использованием научно-исследовательского стенда высокоинтенсивных кавитационных воздействий с применением ультразвуковой установки UIP 1000hd HielscherUltrasonic в 3 %-ном растворе NaCl в воде при частоте колебаний 20 кГц, мощности 1000 Вт и амплитуде 25 мкм в течение 8 – 36 ч. После кавитационного воздействия оценивали степень повреждения и изменение микротвердости поверхности образцов, изменение фазового состава и массы образцов в результате испытаний. Показано, что стали 10Х19Г10Н6АМ2 и 09Х19Г10Н6АМ2Д2 не подвержены образованию питтингов в морской воде и в растворе хлорида железа и имеют скорость общей коррозии ниже, чем у хромоникелевых сталей типа Х18Н9. Ультразвуковая кавитация может приводить не только к поверхностным повреждениям за счет эрозии, усилению локальной коррозии, но и к изменению их физических и механических свойств за счет наклепа и фазовых превращений. Стали 10Х19Г10Н6АМ2 и 09Х19Г10Н6АМ2Д2 с термически и механически стабильным аустенитом более стойки к ультразвуковой кавитации в морской воде по сравнению с хромоникелевыми сталями, особенно с менее прочной и менее стабильной сталью 04Х18Н9. Так, после кавитационного воздействия в течение 36 ч на образцы хромоникелевых сталей 04Х18Н9 и 04Х18АН9, находящиеся в морской воде, наблюдались существенные изменения их состояния: значительное повреждение (травление) и упрочнение поверхности, а также образование небольшого количества мартенсита в стали 04Х18Н9. У образцов сталей 10Х19Г10Н6АМ2 и 09Х19Г10Н6АМ2Д2 обнаружены лишь незначительное изменение состояния поверхности и упрочнение поверхностных слоев.

Ключевые слова: хромоникельмарганцевые азотистые стали, кавитационная стойкость, коррозионная стойкость, питтинговая коррозия, общая коррозия.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-1-49-56

Введение

Аустенитные хромоникельмарганцевые коррозионностойкие стали были созданы как компромиссное решение для достижения высокой стабильности аустенита при пониженных, вплоть до криогенных, температурах без увеличения стоимости и существенного снижения стойкости к общей коррозии.

Вместе с тем, легирование марганцем может приводить к снижению сопротивления локальным видам коррозии, в частности, к питтинговой и межкристаллитной коррозии. Основной метод борьбы – повышение чистоты стали по вредным примесям.

Легирование азотом позволяет не только компенсировать возможное отрицательное влияние марганца, но и существенно повысить стабильность аустенита как при высоких, так и при низких температурах, а также при деформации. Наряду с этим, азот эффективно повышает прочность и, при повышении его содержания в твердом растворе и предотвращении выделения особенно крупных частиц избыточных фаз, сопротивление всем видам коррозии в хлорсодержащих средах [1 – 8].

Детали многих конструкций, машин и механизмов (двигателей, насосов, топливной аппаратуры, отдельных частей обшивки судов) часто работают в условиях кавитирующей жидкости, подвергаясь интенсивной эрозии.

Кавитационное воздействие на твердое тело, помещенное в агрессивную среду, проявляется через различные эффекты: собственно кавитационную эрозию, включающую стадии деформации, упрочнения и разрушения, а также различные виды коррозии. Кавитацион-

* Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (RFMEFI57514X0071).

ное воздействие может заметно снизить сопротивление коррозии, особенно локальной питтинговой.

Установлено [9, 10], что главной причиной кавитационной эрозии металлических поверхностей является схлопывание вблизи них кавитационных пузырьков. Эффект от воздействия одного отдельного пузырька естественно мал, но при воздействии большого числа пузырьков, схлопывающихся с образованием ударных волн, давление которых достигает сотен МПа, как это бывает, например, при ультразвуковой обработке [11, 12], приводит к заметной кавитационной эрозии с образованием глубоких локальных каверн [13].

Отмечают, что повышение прочности и коррозионной стойкости материала может замедлить кавитационную эрозию [14].

Традиционным критерием эрозионной стойкости материала служит потеря его массы (объема) за определенный период времени кавитационного воздействия или длительность инкубационного периода – времени до начала эрозионного разрушения [15 – 17]. Однако, учитывая сложность процессов, определение этих критериев часто недостаточно для описания изменений, происходящих в материале, и обычно используют простое сопоставление кавитационной стойкости различных материалов в конкретной агрессивной среде.

Целью настоящей работы являлась оценка коррозионной стойкости и ультразвуковой кавитационной эрозии в морской воде новых высокопрочных коррозионностойких сталей, сопоставление влияния на эти характеристики разного легирования и уровня механических свойств.

Материал и методика исследования

Исследования выполнены на разработанных [18, 19] высокопрочных аустенитных азотистых хромоникельмарганцевых сталях (10Х19Г10Н6АМ2, 09Х19Г10Н6АМ2Д2) различного состава, хромоникелевой легированной азотом 04Х18АН9 и традиционной стали 04Х18Н9 (табл. 1).

Стали получены лабораторной выплавкой в вакуумной индукционной печи с использованием чистой шихты. Размеры слитков составили: диаметр 80 мм, высота 170 мм, масса слитков 9,5 кг, после отрезки прибыльной части – 7,5 кг. Слитки подвергнуты ковке и прокатке со степенью деформации ~25 % в последнем проходе. Деформация проводилась при температурах, соответствующих аустенитной области, с температуры конца прокатки осуществлялось охлаждение водой (закалка на твердый раствор).

Механические свойства сталей определяли путем измерения твердости HV (ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007), испытаний на растяжение (ГОСТ 1497-84) и ударный изгиб (ГОСТ 9454-78).

Стойкость стали к питтинговой коррозии и общей коррозии определяли в 3 %-ном растворе NaCl в воде.

Испытания на стойкость к питтинговой коррозии осуществляли по ГОСТ 9.912-89 химическим методом в тестовом растворе 100 г/л $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ [20], вычисляли среднюю условную скорость питтинговой коррозии. Поскольку не существует регламента на скорость питтинговой коррозии, стойкость к данному виду коррозии оценивали путем сравнения результатов для разработанных сталей и стали 04Х18Н9.

Стойкость к общей коррозии оценивали испытаниями в синтетической морской воде (3 % NaCl). Определена обычно регламентируемая для коррозионностойких сталей скорость общей коррозии в мм/год (по потере массы образцов Δm, отнесенной к плотности, продолжительности выдержки t и площади поверхности образцов S). О стойкости сталей 10Х19Г10Н6АМ2, 09Х19Г10Н6АМ2Д2 к общей коррозии судили на основе сравнения полученных характеристик исследуемых сталей с таковыми для хромоникелевых сталей 04Х18Н9 и 04Х18АН9.

Оценки кавитационной стойкости проводили с использованием научно-исследовательского стенда высокоинтенсивных кавитационных воздействий с применением ультразвуковой установки UIP 1000hd Hielscher Ultrasonic и установки аппаратно-программный комплекс АПК «Нанохим»[1].

Образцы для исследований кавитационной стойкости в виде дисков размером 50×3,5 мм с полированной поверхностью изготовлены из горячекатаных листов толщиной 4 мм всех исследуемых сталей. Обработку образцов в ультразвуковом поле проводили в ячейке объемом 300 мл в 3 %-ном растворе NaCl в воде при

Таблица 1

Химический состав исследуемых сталей, % (по массе)

Table 1. **Chemical composition of the investigated steels (wt. %)**

Марка стали	C	Cr	Ni	Mn	Mo	Si	Cu	P	S	Al	N
10Х19Г10Н6АМ2	0,096	18,7	6,1	10,1	1,7	0,23	0,01	0,011	<0,005	<0,005	0,31
09Х19Г10Н6АМ2Д2	0,092	19,2	6,0	10,1	1,7	0,20	2,05	0,014	<0,005	<0,005	0,35
04Х18АН9	0,043	18,4	8,9	1,3	0,05	0,22	0,01	0,014	0,015	0,017	0,18
04Х18Н9	0,035	18,5	8,6	1,2	0,05	0,20	0,006	0,014	0,015	0,012	0,02

[1] В проведении экспериментов принимал участие инженер НИТУ «МИСиС» Лысов Д.В.

комнатной температуре (температура поддерживалась постоянной 20 °С при помощи термостата) в течение 8, 24 и 36 ч с контролем состояния поверхности. Частота колебаний составляла 20 кГц, мощность 1000 Вт, амплитуда 25 мкм. Расстояние от сонотрода до образца 10 мм, диаметр сонотрода 22 мм.

Сравнивали степень повреждения поверхности образцов при разных увеличениях – от визуального наблюдения до 500-кратного. Кроме того, оценивали изменение фазового состава магнитнометрически с помощью ферритометра «МВП-2М» и массы образцов в результате испытаний, а также изменение распределения микротвердости HV 0,1 (ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007, нагрузка 100 г, выдержка 15 с) по поверхности испытанных образцов с шагом 1,5 мм.

Результаты и обсуждение

Механические свойства сталей приведены в табл. 2. Наибольшей прочностью при довольно высоких показателях пластичности и вязкости, в том числе и при низких температурах, обладают стали 10Х19Г10Н6АМ2 и 09Х19Г10Н6АМ2Д2. При этом они имеют полностью аустенитную структуру без избыточных фаз [19], что благоприятно для реализации высокой коррозионной стойкости азотистых сталей в хлорсодержащих средах.

После испытаний на стойкость к коррозии в 3 %-ном растворе NaCl на образцах сталей 10Х19Г10Н6АМ2 и 09Х19Г10Н6АМ2Д2 питтинги не обнаружены, на образцах сталей 04Х18АН9 и 04Х18Н9 [20] питтинги образуются, распределены равномерно (рис. 1). Таким образом, по результатам испытаний в 3 %-ном растворе NaCl стали разделились на две группы: не подверженные образованию питтингов в хлорсодержащей среде (стали 10Х19Г10Н6АМ2 и 09Х19Г10Н6АМ2Д2) и подверженные питтинговой коррозии (стали 04Х18Н9 и 04Х18АН9). На всех образцах по краям рабочей зоны, в месте соприкосновения гидроизоляционного уплотнителя с поверхностью металла, появились следы от щелевой коррозии – растрав поверхности в виде круга или его секторов (см. рис. 1).

Таблица 2

Механические свойства исследуемых сталей

Table 2. **Mechanical properties of investigated steels**

Марка стали	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	KCU_{-100}, МДж/м^2
10Х19Г10Н6АМ2	925	690	33	2,25
09Х19Г10Н6АМ2Д2	940	700	27	2,00
04Х18АН9	750	400	63	2,50*
04Х18Н9	570	250	60	–

* Испытания проведены при −163 °С.

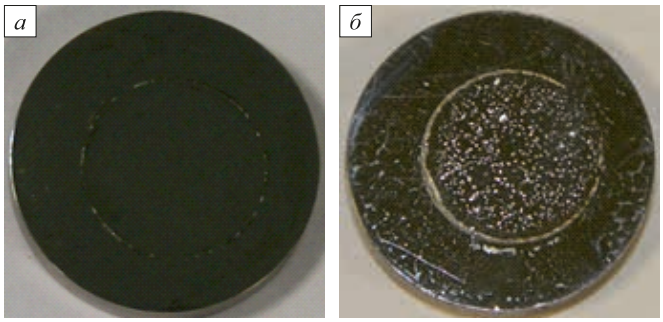

Рис. 1. Внешний вид образцов сталей 09Х19Г10Н6АМ2Д2 (*а*) и 04Х18Н9 (*б*) [20] после испытаний в среде 3 % NaCl (внешний диаметр образцов 20 – 21 мм, диаметр рабочий зоны 11 мм, толщина образцов 3,0 – 4,0 мм)

Fig. 1. Appearance of the samples of steels Cr19Mn10Ni6Mo2Cu2N (*a*) and Cr18Ni9 (*б*) after testing in the environment of 3 % NaCl (external diameter of the samples – 20 – 21 mm, diameter of working zone – 11 mm, thickness of the samples – 3.0 – 4.0 mm)

В табл. 3 приведены данные о скорости коррозии в 3 %-ном растворе NaCl и в тестовом растворе 100 г/л $FeCl_3 \cdot 6H_2O$. Скорость коррозии в 3 % NaCl приведена в обычно принятых единицах мм/год и за 36 ч, т. е. за время испытаний на стойкость к ультразвуковой кавитации.

Оценка стойкости сталей к питтинговой коррозии в тестовом растворе хлорида железа (см. табл. 3) подтвердила результаты аналогичных испытаний в 3 %-ном водном растворе NaCl. Процесс питтинговой коррозии образцов сталей 10Х19Г10Н6АМ2 и 09Х19Г10Н6АМ2Д2 в растворе хлорида железа не протекает, их масса увеличилась из-за образования на поверхности сталей тонкой пленки продуктов общей коррозии, а величины средней условной скорости питтинговой коррозии сталей 04Х18Н9 и 04Х18АН9, как и в случае испытаний в 3 % NaCl, близки между собой.

Таблица 3

Результаты испытаний исследуемых сталей на стойкость к питтинговой коррозии в 100 г/л $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ и к общей коррозии в морской воде (3 % NaCl)

Table 3.**Test results of the investigated steels on resistance to pitting corrosion in 100 g/l, $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ and to general corrosion in seawater (3% NaCl)**

Марка стали	Средняя условная скорость питтинговой коррозии, г·м$^{-2}$ч$^{-1}$	Скорость коррозии, мм/год	Скорость коррозии, мм/36 ч
10Х19Г10Н6АМ2	–	0,0026	$10,7 \cdot 10^{-6}$
09Х19Г10Н6АМ2Д2	–	0,0027	$11,1 \cdot 10^{-6}$
04Х18Н9	6,49	0,0091	$37,4 \cdot 10^{-6}$
04Х18АН9	5,46	0,0058	$23,8 \cdot 10^{-6}$

Скорость общей коррозии в морской воде у всех сталей мала, менее 0,01 мм/год, при этом наименьшее значение получено на образцах сталей 10Х19Г10Н6АМ2 и 09Х19Г10Н6АМ2Д2.

Влияние ультразвукового воздействия в течение 8, 24 и 36 ч в 3 % NaCl привело к следующим эффектам: повреждению поверхности, изменению механических свойств и структуры поверхностных слоев.

Изменение состояния поверхности в ходе ультразвукового воздействия в течение различного времени сравнивали на сталях 09Х19Г10Н6АМ2Д2 и 04Х18Н9. Более подробно на всех сталях исследовали влияние ультразвукового воздействия в течение 36 ч.

Общий вид и схематическое изображение поврежденной поверхности образцов в результате ультразвукового кавитационного воздействия приведены на рис. 2, а на рис. 3, 4 представлены характерные изменения поверхности различных зон исследованных сталей.

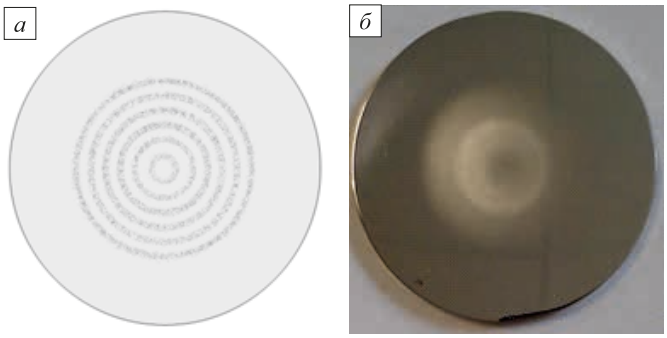

Рис. 2. Схематичное изображение состояния поверхности после кавитационного воздействия (*а*) и внешний вид образца стали 04Х18АН9 после кавитационного воздействия в течение 36 ч в 3 %-ном растворе NaCl (*б*) (диаметр образцов 50 мм)

Fig. 2. Schematic representation of the surface condition after the cavitation (*a*) and appearance of steel Cr18Ni9N sample after cavitation for 36 hours in 3% NaCl solution (*б*) (diameter of the samples – 50 mm)

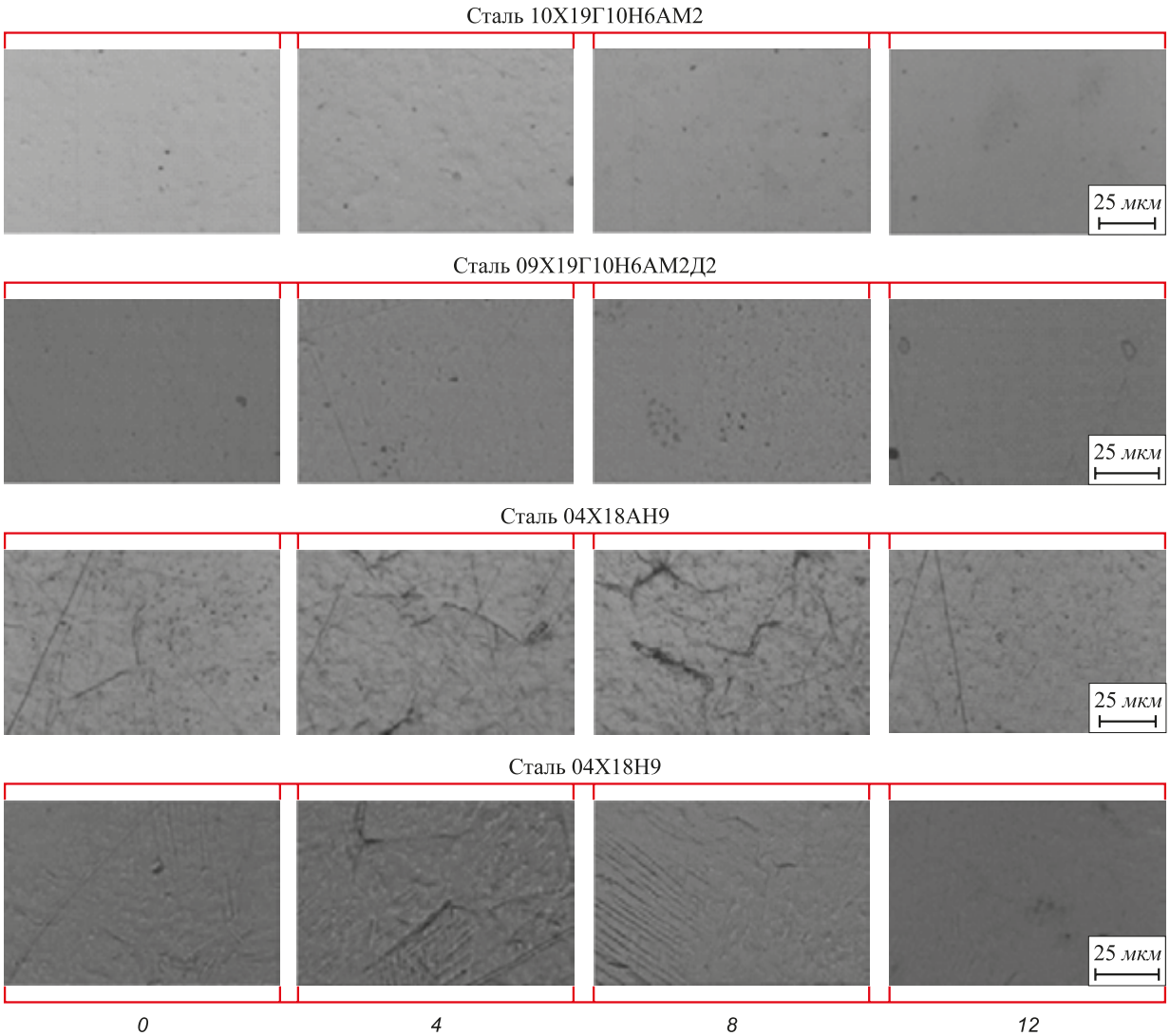

Рис. 3. Состояние поверхности исследуемых образцов после кавитационного воздействия в течение 36 ч в 3 %-ном растворе NaCl, ×500

Fig. 3. Surface condition of the samples after cavitation for 36 hours in 3 % NaCl solution, ×500

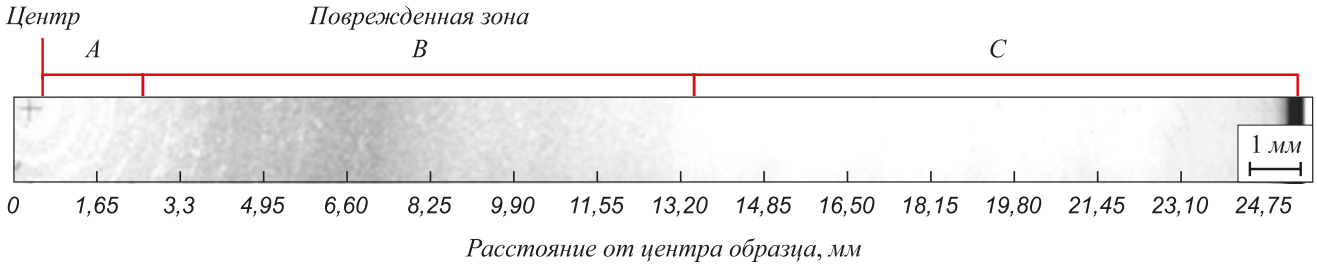

Рис. 4. Панорама поверхности образца стали 04Х18АН9 с обозначением зон после ультразвукового кавитационного воздействия в течение 36 ч в 3 %-ном растворе NaCl

Fig. 4. View of the sample surface of steel Cr18Ni9N with the designation of zones after ultrasonic cavitation exposure for 36 hours in 3 % NaCl solution

Образцы стали 09Х19Г10Н6АМ2Д2 после кратковременного воздействия в течение 8 ч остались блестящими, визуально наблюдался слабозаметный эффект, заключающийся в появлении едва заметной матовости на поверхности образца в виде концентрических окружностей, который незначительно усиливался при увеличении времени воздействия до 24 и 36 ч (см. рис. 2, *а*). Максимальный радиус окружностей составил примерно 16 мм, что несколько больше размера сонотрода. Окружности имеют размытые очертания, расстояние между ними ~0,7 мм, ширина ~0,2 мм. При увеличении 500 на матовых участках поверхности наблюдалась незначительная шероховатость и небольшие точечные повреждения (см. рис. 3, расстояние от центра образца 4 и 8 мм для стали 09Х19Г10Н6АМ2Д2).

Аналогичное изменение состояния поверхности наблюдается на образце стали 10Х19Г10Н6АМ2, но выражено в меньшей степени (см. рис. 3).

Образцы стали 04Х18АН9 и, особенно, стали 04Х18Н9 после ультразвукового воздействия в течение 36 ч заметно отличались от образцов сталей 10Х19Г10Н6АМ2 и 09Х19Г10Н6АМ2Д2.

Поверхность образцов сталей 04Х18Н9 и 04Х18АН9 протравилась более интенсивно, чем образцов сталей 10Х19Г10Н6АМ2 и 09Х19Г10Н6АМ2Д2 при той же длительности кавитационного воздействия. Различалась и картина распределения повреждения поверхности. У образцов сталей 04Х18Н9 и 04Х18АН9 более резко выражена и распространена на меньшее расстояние общая пораженная область, а также выделяется центральная менее поврежденная область радиусом 2 мм. Кольцо радиусом от 2 до 8 мм протравливается наиболее интенсивно, затем интенсивность травления снижается и на расстоянии более 13 мм от центра поверхность остается блестящей. Для стали 04Х18АН9 степень поражения поверхности меньше и, кроме того, в центральной области радиусом 2 мм отчетливо наблюдаются концентрические окружности разной травимости (см. рис. 2, *б* и 4).

На образцах стали 04Х18Н9 при увеличении 500 на матовых (протравленных) участках выявляется значительная шероховатость, повреждения поверхности имеют точечную и игольчатую форму, интенсивность повреждения соответствует степени протравленности поверхности разных областей (см. рис. 3, расстояние от центра образца 0, 4 и 8 мм для стали 04Х18Н9).

На наиболее протравленных участках образцов стали 04Х18АН9 при увеличении 500 также наблюдается шероховатая поверхность, но с точечными и отдельными повреждениями в виде микротрещин (см. рис. 3, расстояние от центра образца 0, 4 и 8 мм для стали 04Х18АН9).

По степени возрастания поражения поверхности через 36 ч воздействия стали расположились в ряд: 10Х19Г10Н6АМ2; 09Х19Г10Н6АМ2Д2; 04Х18АН9; 04Х18Н9. Таким образом, стали 10Х19Г10Н6АМ2 и 09Х19Г10Н6АМ2Д2 и по кавитационной стойкости показали преимущество по сравнению со стандартной сталью типа Х18Н9.

Общая картина наблюдаемых изменений в состоянии поверхности образцов исследуемых сталей приведена в табл. 4. Расположение зон, безусловно, зависит от данных эксперимента и может существенно усложняться в реальных условиях эксплуатации (обозначение зон представлено на рис. 4).

Измерение распределения микротвердости HV 0,1 (см. табл. 4) показало, что в результате длительной (36 ч) ультразвуковой кавитации наблюдается небольшое упрочнение поверхности исследуемых сталей. Повышение твердости составило 20 – 40 HV 0,1 относительно исходного состояния. При этом следует отметить более низкие, практически равные исходному уровню значения твердости центральных зон ($R \approx 2$ мм), а также достаточно большой разброс значений твердости образцов после испытаний. Это связано, очевидно, с особенностями (неравномерностью) процессов деформации и разрушения в условиях испытаний.

Оценка изменения массы образцов в результате испытаний в течение 36 ч показала, что масса образцов сталей в пределах погрешности взвешивания (<0,0001 г) не изменилась, т.е. в условиях данного эксперимента явного изнашивания и потерь металла в результате коррозии и/или эрозии не обнаружено. По крайней мере,

Таблица 4

Характеристики поверхности образцов, подверженных кавитационному воздействию в 3 %-ном растворе NaCl в течение 36 ч

Table 4. **Characteristics of the sample surface exposed to cavitation in the 3 % NaCl solution for 36 hours**

Марка стали	Зона	Протяженность, мм	Состояние поверхности	Микротвердость HV 0,1
10Х19Г10Н6АМ2	*A*	4	Блестящая; с небольшими точечными повреждениями	240 – 300
	B	12	Блестящая, с незначительной матовостью; с небольшими точечными повреждениями и незначительной шероховатостью	270 – 320
	C	9	Блестящая	280 – 310
09Х19Г10Н6АМ2Д2	*A*	4	Блестящая; с небольшими точечными повреждениями	260 – 310
	B	12	Блестящая, с незначительной матовостью; с небольшими точечными повреждениями и незначительной шероховатостью	280 – 330
	C	9	Блестящая	280 – 300
04Х18Н9	*A*	2	Матовая; шероховатая с повреждениями точечной и игольчатой формы	200 – 240
	B	11	Матовая, протравленная; с повреждениями точечной и игольчатой формы, со значительной шероховатостью	220 – 260
	C	12	Блестящая; с точечными повреждениями	230 – 250
04Х18АН9	*A*	2	Матовая; с повреждениями точечными и в виде трещин, с шероховатостью	220 – 260
	B	11	Матовая, протравленная; с повреждениями точечными и в виде трещин, со значительной шероховатостью	260 – 280
	C	12	Блестящая; с точечными повреждениями	240 – 260

они могли быть не более погрешности измерений и величины привеса за счет образующейся пленки продуктов травления.

Деформация и изменение температуры при ультразвуковой кавитации могут привести и к фазовым превращениям в аустенитных сталях, таким как мартенситное превращение и деформационное старение.

Действительно, в стали 04Х18Н9 с довольно высоким уровнем температуры $M_Н = 61$ °С [19] после 36-часового испытания появляется небольшое количество мартенсита, который наблюдается в виде «игольчатой» структуры в наиболее поврежденных областях (см. рис. 3). Магнитнометрически с помощью ферритометра, имеющего размер индентора ~1 мм, наблюдается появление α-фазы (~0,15 %).

Образцы более термически и механически стабильных сталей 10Х19Г10Н6АМ2, 09Х19Г10Н6АМ2Д2 и 04Х18АН9 после 36-часового кавитационного воздействия остались немагнитными.

Таким образом, ультразвуковая кавитация может приводить не только к поверхностным повреждениям за счет эрозии, усилению локальной коррозии даже в сталях, не склонных к образованию питтингов, но и к изменению физических и механических свойств за счет наклепа и фазовых превращений.

Выводы

По сравнению с хромоникелевыми сталями типа Х18Н9 высокопрочные азотистые хромоникельмарганцевые аустенитные стали 10Х19Г10Н6АМ2 и 09Х19Г10Н6АМ2Д2 имеют более высокую коррозионную стойкость к общей и питтинговой коррозии в растворе хлорида железа и морской воде.

Ультразвуковая кавитация аустенитных коррозионностойких сталей может приводить не только к поверхностным повреждениям за счет эрозии, наклепа, разрушения и усиления локальной коррозии, но и к фазовым превращениям. Стали с термически и механически стабильным аустенитом более стойки к ультразвуковой кавитации.

Для замены сталей типа Х18Н9 можно рекомендовать стали 10Х19Г10Н6АМ2 и 09Х19Г10Н6АМ2Д2 как экономнолегированные, более высокопрочные, коррозионно- и кавитационностойкие в морской воде.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Jargelius-Pettersson R.F.A. Application of the pitting resistance equivalent concept to some highly alloyed austenitic stainless steels // Corrosion. 1998. Vol. 54 (2). P. 162 – 168.

2. Горынин И.В., Малышевский В.А., Калинин Г.Ю. и др. Коррозионно-стойкие высокопрочные азотистые стали // Вопросы материаловедения. 2009. № 3 (59). С. 7 – 16.
3. Науменко В.В., Шлямнев А.П., Филиппов Г.А. Азот в аустенитных нержавеющих сталях различных систем легирования // Металлург. 2011. № 6. С. 46 – 53.
4. Мушникова С.Ю., Легостаев Ю.Л., Харьков А.А. и др. Исследование влияния азота на стойкость к питтинговой коррозии аустенитных сталей // Вопросы материаловедения. 2004. № 2(38). С. 126 – 135.
5. Kaputkina L.M. , Smarygina I.V. , Kaputkin D.E. etc. Effect of nitrogen addition on physicochemical properties and corrosion resistance of corrosion-resistant steels // Metal Science and Heat Treatment. 2015. Vol. 57(7). P. 395 – 401.
6. Janik-Czachor M., Lunarska E., Szklarska-Smialowska Z. Effect of nitrogen content in a 18Cr-5Ni-10Mn stainless steel on the pitting susceptibility in chloride solutions // Corrosion. 1975. Vol. 31(11). P. 394 – 398.
7. Azuma Shigeki , Miyuki Hideaki , Kudo Takeo. Effect of alloying nitrogen on crevice corrosion of austenitic stainless steels // ISIJ International. 1996. Vol. 36 (7). P. 793 – 798.
8. Loable C., Viçosa I.N., Mesquita T.J. etc. Synergy between molybdenum and nitrogen on the pitting corrosion and passive film resistance of austenitic stainless steels as a pH-dependent effect // Materials Chemistry and Physics. 2017. Vol. 186. P. 237 – 245.
9. Козырев С.П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации. – М.: Машиностроение, 1971. – 240 с.
10. Георгиевская Е.П. Кавитационная эрозия гребных винтов и методы борьбы с ней. – Л.: Судостроение, 1978. – 208 с.
11. Lauterborn W. Cavitation and coherent optics // Cavitation and Inhomogeneities in Underwater Acoustics. – Berlin, Heidelberg: Springer, 1980. P. 3 – 12.
12. Prikhod'ko V.M., Aleksandrov V.A., Fatyukhin D.S., Petrova L.G. Effect of ultrasonic cavitation on nitridedsteel surface layer condition // Metal Science and Heat Treatment. 2015. Vol. 57(5 – 6). P. 300 – 303.
13. Приходько В.М. Ультразвуковые технологии при производстве, эксплуатации и ремонте транспортной техники. – М: Техполиграфцентр, 2003. – 253 с.
14. Мерсон Д.Л., Линдров М.Л. Влияние кавитации на деструкцию поверхности конструкционных сталей // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2010. № 3. С. 43 – 45.
15. Пирсол И.С. Кавитация. – М.: Мир, 1975. – 95 с.
16. Основы физики и техники ультразвука / Б.А. Агранат, М.Н. Дубровин, Н.Н. Хавский и др. – М: Высшая школа, 1987. – 352 с.
17. Шестоперов В.Ю. Кавитационное разрушение материалов и критерии оценки их эрозионной стойкости // Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 5 (102). С. 79 – 83.
18. Kaputkina L.M., Svyazhin A.G., Smarygina I.V. etc. High-strength corrosion-resistant cryogenic steel alloyed with nitrogen // Metallurgist. 2016. Vol. 60 (7). P. 802 – 809.
19. Kaputkina L.M., Svyazhin A.G., Smarygina I.V., Kindop V.E. Influence of nitrogen and copper on hardening of austenitic chromium-nickelmanganese stainless steel // CIS Iron and Steel Review. 2016. Vol. 11. P. 30 – 34.
20. Капуткина Л.М., Свяжин А.Г., Смарыгина И.В., Бобков Т.В. Коррозионная стойкость в разных средах высокопрочной аустенитной азотистой хромоникельманганцевой стали // Изв. вуз. Черная металлургия. 2016. № 9. С. 663 – 670.

Поступила в редакцию 27 октября 2017 г.
После доработки 27 октября 2017 г.
Принята к публикации 22 декабря 2018 г.

Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2019. Vol. 62. No. 1, pp. 49–56.

CORROSION AND CAVITATION RESISTANCE IN SEAWATER OF CHROMIUM–NICKEL–MANGANESE HIGH-STRENGTH NITROGEN AUSTENITIC STEELS

L.M. Kaputkina, A.G. Svyazhin, I.V. Smarygina, V.E. Kindop

National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS), Moscow, Russia

Abstract. Corrosion and cavitation resistance in seawater of high-strength economically alloyed nitrogen chromium–nickel–manganese steels Cr19Mn10Ni6Mo2N and Cr19Mn10Ni6Mo2Cu2N is experimentally studied compared to chromium-nickel steels Cr18Ni9 and Cr18Ni9N. Tests for resistance to pitting corrosion were carried out according to the chemical method in the test solution 100 g/l $FeCl_3 \cdot 6H_2O$. Resistance to general corrosion was assessed by tests in synthetic seawater (3 % NaCl). Test for cavitation resistance in seawater was performed using a research stand of high-intensity cavitation effects with the use of ultrasonic devices UIP 1000 hd Hielscher Ultrasonic in 3 % NaCl solution in water at a frequency of 20 kHz, a power of 1000 W and amplitude of 25 microns for 8 – 36 hours. The extent of damage and change in the surface microhardness, change in the phase composition and mass of the samples were assessed after cavitation. It is shown that steels Cr19Mn10Ni6Mo2N and Cr19Mn10Ni6Mo2Cu2N are more susceptible to pitting in seawater and in solution of ferric chloride, and have the general corrosion rate lower than that of chromium-nickel steels type Cr18Ni9. It is shown that ultrasonic cavitation can not only lead to surface damage due to erosion, enhance local corrosion, but also to changes in their physico-mechanical properties by strain hardening and phase transformations. Steels Cr19Mn10Ni6Mo2N and Cr19Mn10Ni6Mo2Cu2N with thermally and mechanically stable austenite are more resistant to ultrasonic cavitation in the seawater in comparison with chromium-nickel steels, especially those with less strength and less resistant steel Cr18Ni9. So subjected to cavitation in the seawater for 36 hours, samples of chromium-nickel steels Cr18Ni9 and Cr18Ni9N had a significant change in their condition: significant damage (etching) and surface hardening, and there was formation of a small amount of martensite in steel Cr18Ni9. Samples of steels Cr19Mn10Ni6Mo2N and Cr19Mn10Ni6Mo2Cu2N had only minor changes in surface conditions and hardening of the surface layers.

Keywords: chromium–nickel–manganese nitrogen steel, cavitation resistance, corrosion resistance, pitting corrosion, general corrosion.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-1-49-56

REFERENCES

1. Jargelius-Pettersson R.F.A. Application of the pitting resistance equivalent concept to some highly alloyed austenitic stainless steels. *Corrosion*. 1998, vol. 54 (2), pp. 162–168.
2. Gorynin I.V., Malyshevskii V.A., Kalinin G.Yu. etc Corrosion-resistant high-strength nitrogen steels. *Voprosy materialovedeniya*. 2009, no. 3 (59), pp. 7–16. (In Russ.).
3. Naumenko V.V., Shlyamnev A.P., Filippov G.A. Nitrogen in austenitic stainless steels of different alloying systems. *Metallurgist*. 2011, vol. 55, no. 5-6, pp. 410–418.
4. Mushnikova S.Yu., Legostaev Yu.L., Khar'kov A.A. etc. Investigation of the effect of nitrogen on resistance to pitting corrosion of austenitic steels. *Voprosy materialovedeniya*. 2004, no. 2 (38), pp. 126–135. (In Russ.).
5. Kaputkina L.M., Smarygina I.V., Kaputkin D.E., Svyazhin A.G., Bobkov T.V. Effect of nitrogen addition on physicochemical proper-

ties and corrosion resistance of corrosion-resistant steels. *Metal Science and Heat Treatment*. 2015, vol. 57, no.7, pp. 395–401.

6. Janik-Czachor M., Lunarska E., Szklarska-Smialowska Z. Effect of nitrogen content in a 18Cr-5Ni-10Mn stainless steel on the pitting susceptibility in chloride solutions. *Corrosion*. 1975, vol. 31, no. 11, pp. 394–398.

7. Azuma Shigeki , Miyuki Hideaki , Kudo Takeo. Effect of alloying nitrogen on crevice corrosion of austenitic stainless steels. *ISIJ International*. 1996, vol. 36 (7), pp. 793–798.

8. Loable C., Viçosa I.N., Mesquita T.J., Mantel M., Nogueira R.P., Berthom G., Chauveau E., Roche V. Synergy between molybdenum and nitrogen on the pitting corrosion and passive film resistance of austenitic stainless steels as a pH-dependent effect. *Materials Chemistry and Physics*. 2017, vol. 186, pp. 237–245.

9. Kozyrev S.P. *Gidroabrazivnyi iznos metallov pri kavitatsii* [Hydroabrasive wear of metals during cavitation]. Moscow: Mashinostroenie, 1971, 240 p. (In Russ.).

10. Georgievskaya E.P. *Kavitatsionnaya eroziya grebnykh vintov i metody bor'by s nei* [Cavitation erosion of propellers and methods of dealing with it]. Leningrad: Sudostroenie, 1978, 208 p. (In Russ.).

11. Lauterborn W. Cavitation and coherent optics. In: *Cavitation and Inhomogeneities in Underwater Acoustics*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1980, pp. 3–12.

12. Prikhod'ko V.M., Aleksandrov V.A., Fatyukhin D.S., Petrova L.G. Effect of ultrasonic cavitation on nitrided steel surface layer condition. *Metal Science and Heat Treatment*. 2015, vol. 57 (5-6), pp. 300–303.

13. Prikhod'ko V.M. *Ul'trazvukovye tekhnologii pri proizvodstve, ekspluatatsii i remonte transportnoi tekhniki* [Ultrasonic technologies in the production, operation and repair of transport equipment]. Moscow: Tekhpoligraftsentr, 2003, 253 p. (In Russ.).

14. Merson D.L., Lindrov M.L. Effect of cavitation on structural steels surface destruction. *Vektor nauki Tol'yattinskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2010, no. 3, pp. 43–45. (In Russ.).

15. Pearsall J.S. *Cavitation (Mechanics Engineering: Monograph)*. Mills & Boon, 1972, 80 p. (Russ.ed.: Pearsall J.S. *Kavitatsiya*. Moscow: Mir, 1975, 95 p.).

16. Agranat B.A., Dubrovin M.N., Khavskii N.N. etc. *Osnovy fiziki i tekhniki ul'trazvuka* [Basics of ultrasound physics and technology]. Moscow: Vysshaya shkola, 1987, 352 p. (In Russ.).

17. Shestoperov V.Yu. Cavitation destruction of materials and the criteria for assessing their erosion resistance. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2013, no. 5 (102), pp. 79–83. (In Russ.).

18. Kaputkina L.M., Svyazhin A.G., Smarygina I.V., Kindop V.E., Bazhenov V.E. High-strength corrosion-resistant cryogenic steel alloyed with nitrogen. *Metallurgist*. 2016, vol. 60, no. 7, pp. 802–809.

19. Kaputkina L.M., Svyazhin A.G., Smarygina I.V., Kindop V.E. Influence of nitrogen and copper on hardening of austenitic chromium-nickel-manganese stainless steel. *CIS Iron and Steel Review*. 2016, vol. 11, pp. 30–34.

20. Kaputkina L.M., Svyazhin A.G., Smarygina I.V., Bobkov T.V. Corrosion resistance in different media of high-strength austenitic nitrogenous chromium-manganese steel. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, no. 9, pp. 663–670. (In Russ.).

Acknowledgements. The results were obtained in the framework of fulfillment of the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (RFMEFI57514X0071).

Information about the authors:

L.M. Kaputkina, *Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Chief Researcher of the Chair "Metal Forming"* (kaputkina@mail.ru)

A.G. Svyazhin, *Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher of the Chair of Metallurgy of Steel, New Production Technologies and Metal Protection*

I.V. Smarygina, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Plastic Deformation of Special Alloys*

V.E. Kindop, *Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Deputy Head of Science Department*

Received October 27, 2017
Revised October 27, 2017
Accepted December 22, 2018