



ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАВИТАЦИОННО-КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА СИСТЕМ ЛЕГИРОВАНИЯ Fe–Cr–Ni–(Mo) В 92 %-М РАСТВОРЕ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ

А. В. ПАТЮПКИН, Д. А. АНТОНЮК, инженеры (Запорож. нац. техн. ун-т)

Предложена эмпирическая зависимость влияния основных легирующих элементов в сложнолегированных нержавеющих системах легирования (Fe–Cr–Ni–(Mo)) на кавитационно-коррозионную стойкость наплавленного металла в концентрированных растворах серной кислоты.

Ключевые слова: кавитационно-коррозионная стойкость, нержавеющие стали и сплавы, серная кислота, испытание, математическая модель, статистическая обработка

Технологическое оборудование системы откачки анодного хлора (хлорные компрессоры, центробежные насосы, запорная арматура и др.) титаномагниевого комбинатов преимущественно работает в 92...98%-м растворе серной кислоты, что оказывает существенное влияние на интенсивность процесса кавитационного разрушения основных деталей машин [1]. Поэтому выбор износостойкого материала для изготовления быстроизнашиваемых узлов должен учитывать совместное воздействие кавитационного и коррозионного факторов. В связи с обширной номенклатурой нержавеющих сталей и сплавов, рекомендуемых для работы в кислых средах, и высокой степенью их легирования изучено влияние последнего по эквивалентам никеля и хрома на кавитационно-коррозионную стойкость металлов [2]. Кавитационно-коррозионные испытания проводили на специальном ударно-эрозионном стенде по методике, описанной в работе [3].

Согласно статистической обработке данных лабораторных исследований кавитационно-коррозионной стойкости сталей и сплавов системы Fe–Cr–Ni, Fe–Cr–Ni–Mo и Fe–Cr–Ni–Mo–Cu определена оптимальная область значений $Ni_{э\text{кв}} = 24...31 \%$ и $Cr_{э\text{кв}} = 23...26; 30...31 \%$ [2]. В области повышенной стойкости находятся следующие стали и сплавы: 06X23H18, 08X23H18M5, 08X23H28M2T, 06X23H28M3ДЗТ и 06X24H21. При этом кавитационно-коррозионная стойкость стали 08X23H18M5 находится в том же диапазоне, что и у сплава 06X23H28M3ДЗТ (таблица), несмотря на

высокую степень легирования последнего. Исходя из этого, возникла необходимость изучения влияния конкретных легирующих составляющих на кавитационно-коррозионную стойкость металлов. Основными элементами данных нержавеющих сталей и сплавов, регулирующими показатели стойкости, являются углерод, хром, никель и молибден. Углерод расширяет γ -область и является интенсивным аустенитнообразующим элементом, коэффициент аустенитизирующего эффекта кото-

Кавитационно-коррозионная стойкость наплавленного металла

Серия образцов	Наплавленный металл	Содержание элементов, мас. %			Потери массы образцов, г, в 92%-м растворе H ₂ SO ₄
		Cr	Ni	Mo	
1	10X18H10T	18,1	10,5	—	1,96
2	07X14H20	14,0	20,5	—	1,65
3	07X15H21	15,0	20,9	—	1,63
4	08X15H21M6	15,1	20,9	5,4	0,79
5	08X17H24M3Д	17,0	24,2	3,0	1,37
6	08X18H24M3Д	18,2	24,3	2,9	1,31
7	12X18H25M3	18,0	25,1	3,2	0,82
8	10X15H21M6	15,3	21,1	5,9	0,68
9	10X14H29M5	14,0	29,1	5,3	0,61
10	10X14H29M6	14,4	29,0	5,9	0,57
11	08X15H30	15,2	30,1	—	1,26
12	07X16H30	16,0	29,8	—	1,37
13	14X19H25M3Д	19,0	24,9	3,0	0,92
14	06X23H18	22,8	18,0	—	0,65
15	08X23H18M5	22,9	18,2	5,3	0,5
16	08X23H28M2T	23,2	28,0	1,9	0,71
17	06X23H28M3ДЗТ	23,1	28,0	2,9	0,46
18	06X24H21	24,0	21,0	—	0,59

Примечания. 1. Испытания проводили в 92%-м растворе H₂SO₄ при температуре 60 °С. 2. Длительность испытаний 10 ч.

рого равен 30 (у никеля 1) [4]. По утверждению авторов работы [5], при наличии аустенитно-ферритной структуры разрушение будет развиваться в феррите, что обуславливает увеличение кавитационной стойкости стали с пониженным содержанием ферритной фазы в результате увеличения аустенитной. В работе [5] также показано, что при увеличении содержания углерода у закаленной стали от 0,023 до 0,8 мас. % потери массы за 5 ч испытаний снижаются от 0,650 до 0,180 г и происходит повышение твердости. Однако увеличение содержания углерода приводит к обеднению стали или сплава хромом и соответственно уменьшается стойкость металла к межкристаллитной коррозии, поэтому содержание углерода в испытуемых нержавеющей сталях и сплавах не превышало 0,08 % и в дальнейшем рассматривали влияние хрома, никеля и молибдена на кавитационно-коррозионную стойкость металлов.

По экспериментальным данным выполнен регрессионно-корреляционный анализ и построена математическая зависимость влияния этих компонентов на потерю массы образцов при кавитационно-коррозионном ($P_{H_2SO_4}$) воздействии:

$$P_{H_2SO_4} = f(Ni, Cr, Mo).$$

Эмпирическую зависимость находили на основании метода наименьших квадратов [6–8]. По данным лабораторных испытаний (см. таблицу) подбирали наиболее близкую теоретическую кривую, уравнение которой описывает функциональную и корреляционную зависимость между исследуемыми величинами. Решение задачи проводили аналогично изучению влияния $Ni_{э\text{кв}}$ и $Cr_{э\text{кв}}$ на кавитационную и кавитационно-коррозионную стойкость по методике [2], только в данном случае элементами матриц являлись значения содержания хрома, никеля и молибдена в наплавленном металле и данные лабораторных испытаний (см. таблицу).

В результате математического анализа получено уравнение, определяющее кавитационно-коррозионную стойкость (потери массы образцов, г) металла в зависимости от массового содержания (%) основных легирующих компонентов:

$$P_{H_2SO_4} = 12,8419 - 0,5648Cr - 0,6057Ni + 0,8264Mo + 0,0235CrNi + 0,0393CrMo - 0,0277NiMo - 0,0016CrNiMo + 0,0025Cr^2 + 0,0062Ni^2 - 0,1649Mo^2 + 0,0002Ni^2Mo^2.$$

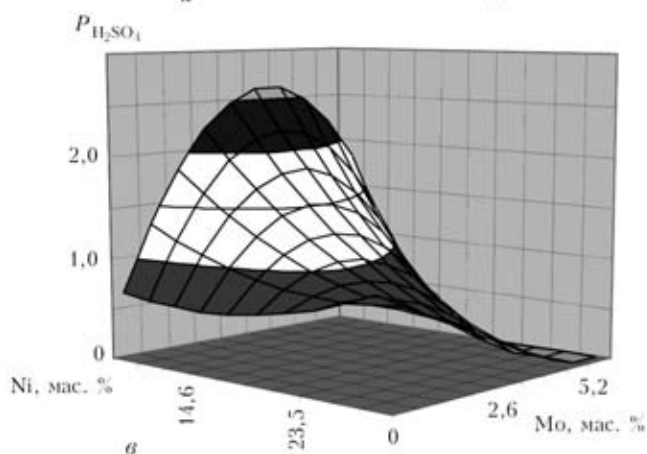
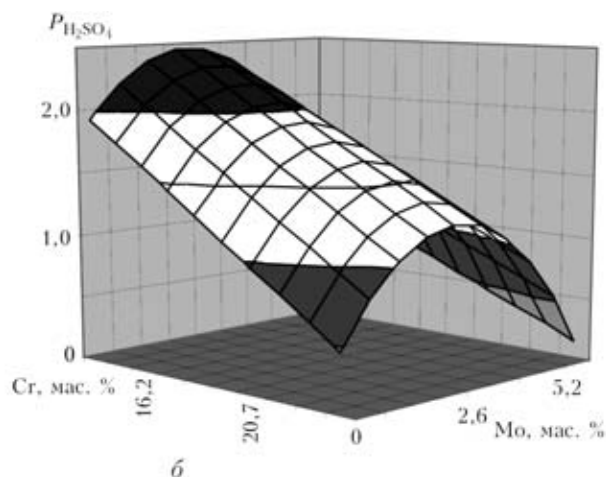
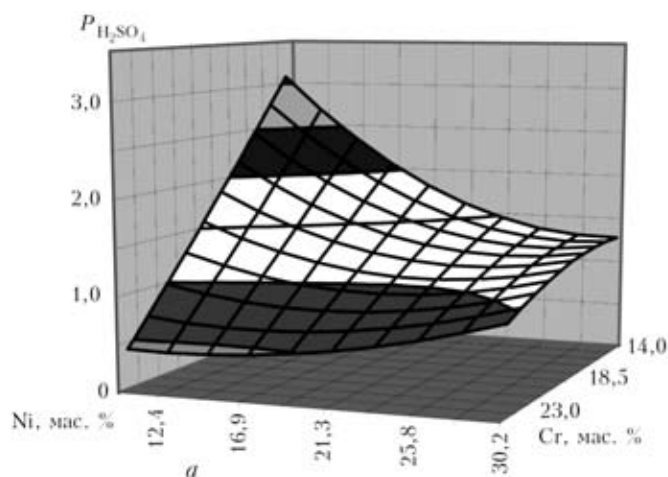
Среднее значение абсолютной ошибки для данного случая не превышает 5 % (0,56), а коэффициент корреляции находится выше значения 0,7, что указывает на адекватность полученной модели. По опытным и расчетным значениям по-

казателей кавитационной и кавитационно-коррозионной стойкости исследуемых сталей и сплавов проводили статистическую обработку данных: при этом коэффициент корреляции составил 0,86; дисперсия адекватности 0,007; воспроизводимости 0,006; расчетный критерий Фишера 1,25, табличный 1,99; расчетный критерий Кохрена 0,06, табличный 0,219. Значения расчетного критерия Фишера для двух случаев ниже табличного показателя, что свидетельствует о достоверности эмпирических зависимостей. В связи с наличием дисперсий больше двух и то, что одна из них значительно превышает остальные, определяли их однородность через критерий Кохрена [4–6]. Расчетные значения критерия Кохрена для обоих случаев не превышают табличных, что подтверждает гипотезу об однородности дисперсий.

На основании проведенного статистического анализа можно утверждать, что полученное уравнение регрессии является достоверным при большой корреляционной связи и его целесообразно использовать для прогнозирования кавитационно-коррозионной стойкости сплавов системы Fe–Cr–Ni и Fe–Cr–Ni–Mo.

При комплексном воздействии кавитации и коррозии на основании данных лабораторных исследований построены гиперплоскости влияния хрома, никеля и молибдена на кавитационно-коррозионную стойкость наплавленного металла (рисунок). Повышение содержания хрома практически во всем диапазоне концентраций никеля приводит к заметному увеличению кавитационно-коррозионной стойкости металла (рисунок, а). Увеличение содержания хрома для условий коррозионного воздействия рекомендовано многими авторами [7–10], так как он снижает склонность металла к межкристаллитной коррозии. Введение в наплавленный металл до 27 % хрома на порядок повышает минимальное время до возникновения межкристаллитной коррозии [9].

Коррозионная стойкость сплавов системы Fe–Cr–Ni также зависит от содержания никеля. Так, с повышением содержания последнего от 10 до 15 % коррозионная стойкость сначала возрастает, достигая максимума, затем уменьшается при концентрации никеля 25 и 35 % [9], что коррелирует с данными лабораторных испытаний (рисунок, а). С введением до 2 % Mo в стали с 23 % Cr и 18...20 % Ni кавитационно-коррозионная стойкость металла ухудшается (рисунок, б), что объясняется неустойчивостью данных сталей в концентрированных растворах серной кислоты при повышенных температурах [9]. При содержании молибдена до 6% повышается склонность металла к пассивированию (снижается ток пассивации и ток в пассивном состоянии), что, в свою очередь, стабилизирует устойчивость пассивного состояния. По мнению авторов [9], пластическая дефор-



Влияние хрома, никеля и молибдена на кавитационно-коррозионную стойкость ($P_{H_2SO_4}$) наплавленного металла

мация со степенью обжатия до 50% не оказывает заметного влияния на скорость коррозии в растворе серной кислоты сталей и сплавов, содержащих 18...20% Cr, 12...28% Ni и легированных до 5...6% Mo.

Хорошие показатели кавитационно-коррозионной стойкости имеет сплав 06X23H28M3Д3Т (06XH28MДТ), который широко используется в отечественной промышленности для работы в растворах серной кислоты различной концентрации. Высокие показатели стойкости его при легировании 3 % Mo обусловлены дополнительным введением в сплав меди, которая уменьшает площадь анодных участков при накоплении ее на поверхностном слое. Процесс протекает в области потенциалов активного растворения меди. При обмене (электрохимическая реакция) последняя переходит из электролита, осаждаясь на поверхность сплава и создавая защитный экранирующий слой [11]. Данные лабораторных испытаний подтверждаются исследованиями, приведенными в работе [12]. Согласно полученной гиперплоскости влияния никеля и молибдена на кавитационно-коррозионную стойкость наплавленного металла (рисунок, в), наименьшие потери массы образцов наблюдаются при легировании металла 18...20% Ni без содержания молибдена и при содержании последнего в диапазоне 5...6%. Приведенные ма-

тематические и статистические результаты лабораторных испытаний ряда сложнолегированных нержавеющей сталей и сплавов позволяют выбрать экономнолегированный состав наплавленного металла, имеющего повышенную кавитационно-коррозионную стойкость. Оптимальные показатели последней в условиях воздействия 92%-го раствора H_2SO_4 имеет сталь 08X23H18M5, не уступающая сплавам 08X23H28M2Т и 06X23H28M3Д3Т. Для более глубокого объяснения явлений, сопутствующих повышению показателей стойкости стали 08X23H18M5, необходимо проведение дополнительных исследований.

Полученная эмпирическая зависимость влияния основных легирующих компонентов (хрома, никеля и молибдена), сложнолегированных нержавеющей сталей и сплавов на кавитационно-коррозионную стойкость наплавленного металла позволяет осуществить выбор оптимального состава износостойкого металла для деталей химических аппаратов, работающих в концентрированных растворах серной кислоты. К области оптимального легирования относятся составы, содержащие, мас. %: 23...25 Cr; 18...20 Ni; 5...6 Mo и 23...25 Cr; 25...28 Ni; 3...5 Mo.

Особый интерес представляет сталь 08X23H18M5, кавитационно-коррозионная стойкость которой находится на одном уровне с по-

казателями сплава 06X23H28M3ДЗТ при пониженном (на 10 %) содержании никеля у первой.

1. Патюкин А. В., Рудычев А. С., Быковский О. Г. Кавитационно-коррозионная стойкость наплавленных нержавеющих сталей и сплавов // Автомат. сварка. — 2000. — № 8. — С. 38–40.
2. Патюкин А. В., Антонюк Д. А. Влияние легирования на кавитационно-коррозионную стойкость нержавеющих сталей и сплавов // То же. — 2005. — № 4. — С. 16–18.
3. Патюкин А. В. Влияние коррозионного фактора на кинетику кавитационно-коррозионного изнашивания нержавеющих сталей и сплавов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. — 2004. — № 1. — С. 143–145.
4. Каховский Н. И. Сварка высоколегированных сталей. — Киев: Техника, 1975. — 376 с.
5. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. — М.: Наука, 1976. — 279 с.
6. Хартман К., Лецкий Э., Шефер В. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. — М.: Мир, 1977. — 552 с.
7. Мышкис А. Д. Лекции по высшей математике. — М.: Наука, 1967. — 640 с.
8. Богачев И. Н. Кавитационное разрушение и кавитационно-стойкие сплавы. — М.: Металлургия, 1972. — 192 с.
9. Ульянов Е. А., Свистунова Т. В., Левин Ф. Л. Высоколегированные коррозионно-стойкие сплавы. — М.: Металлургия, 1987. — 88 с.
10. Чигал В. Межкристаллитная коррозия нержавеющих сталей. — Л.: Химия, 1969. — 232 с.
11. Туфанов Д. Г. Коррозионная стойкость нержавеющих сталей, сплавов и чистых металлов. — М.: Металлургия, 1990. — 320 с.
12. Чукаловская Т. В., Томашов Н. Д., Майская В. Д. О механизме анодного растворения молибдена в водных электролитах // Защита металлов. — 1984. — № 6. — С. 864–871.

An empirical dependence is proposed of the influence of the main alloying elements in complex-alloyed stainless alloying systems (Fe–Cr–Ni–Mn) on the cavitation-corrosion resistance of the deposited metal in concentrated solutions of sulphuric acid.

Поступила в редакцию 29.06.2005

ПЛАЗМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

Плазменные ковши-печи (ПКП) — это новая генерация современных агрегатов комплексной внепечной обработки сталей (АКВОС), в которых компенсация тепловых потерь или подогрев шлакового и металлургического расплава осуществляется с помощью низкотемпературной плазмы. ПКП не только сохраняют все известные достоинства дуговых ковшей-печей, но и имеют преимущества, которые обусловлены высокой эффективностью, экономичностью и надежностью преобразования электрической энергии в тепловую, повышенной стабильностью, управляемостью и чистотой плазменного разряда, лучшей герметичностью рабочего пространства, контролируемостью атмосферы и диапазона давлений.

Эти преимущества позволяют расширить энергетические, технологические и металлургические возможности АКВОС, снизить удельный расход электроэнергии, продолжительность подогрева и износ футеровки ковшей, способствуют повышению степени усвоения легирующих элементов, активному использованию газовой и шлаковой фаз, исключению загрязнения металла углеродом, азотом и водородом, улучшению качества получаемой стали, экологии технологического процесса и санитарно-гигиенических условий труда.

ПКП оборудованы плазменными нагревательными комплексами (ПНК) мощностью до 6 МВт. Скорость нагрева стали в ПКП с ПНК мощностью до 6 МВт составляет 3...5 °С/мин при емкости ковша 30 т и до 1,5 °С/мин при емкости ковша 100 т.

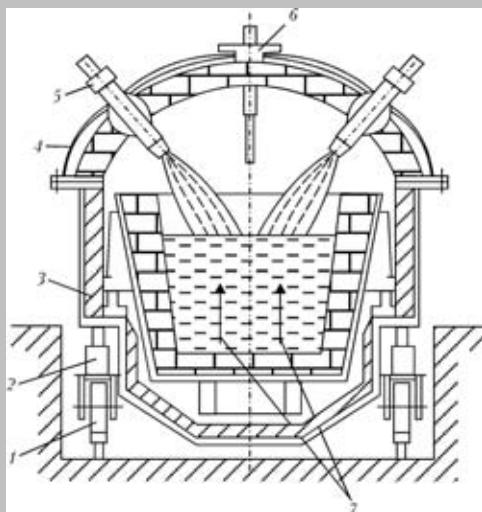


Схема плазменного ковша-печи: 1 — сталевоз; 2 — гидроцилиндр; 3 — камера; 4 — крышка водоохлаждаемая; 5 — плазмотрон; 6 — термозонд; 7 — расплав, продуваемый газом

Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, отд. № 20
Тел./факс: (38044) 287 60 57
E-mail: shapovalov@paton.kiev.ua