

УДК 669.791.92: 669.018.25

Патюпкин А.В.¹, Рудычев А.С.², Грешта В.Л.³, Солидор Н.А.⁴

**РАЗРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ПРИ
СОВМЕСТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НИХ КАВИТАЦИИ, КОРРОЗИИ И
АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ**

В статье разработаны рациональные составы сталей аустенитного класса с повышенной кавитационно-коррозионно-абразивной стойкостью. Установлена формула для регулирования фазового состава сталей в зависимости от содержания в них основных легирующих компонентов.

Ключевые слова: кавитация, коррозия, абразивное изнашивание, сталь, микроструктура, аустенит, легирование, иттрий.

Патюпкін А.В., Рудичев А.С., Грешта В.Л., Солідор Н.А. Розробка матеріалів і відновлення деталей при сумісній дії на них кавітації, корозії та абразивного зношування. В статті розроблені раціональні склади сталей аустенітного класу з підвищеною кавітаційно-корозійно-абразивною стійкістю. Встановлено формулу для регулювання фазового складу сталей в залежності від вмісту в них основних легувальних компонентів.

Ключові слова: кавітація, корозія, абразивне зношування, сталь, мікроструктура, аустеніт, легування, ітрій.

Patupkin A.V., Rudichev A.S., Greshtha V.L., Solidor N.A. The development of materials and renewal of details at joint influence on them of cavitation, corrosion and abrasive wear resistance. In this work the development of rational composition of austenitic stainless steels which the abnormally high cavitation-corrosion-abrasive wear resistance. The establishment formula for regulation of phase composition steels from quantity of alloying elements.

Keywords: cavitation, corrosion, abrasive wear resistance, steel, microstructure, austenite, alloying, yttrium.

Постановка проблемы. В настоящее время при изготовлении оборудования, машин, механизмов и систем гидротранспорта производств серной и фосфорной кислот используют в основном высоколегированные коррозионностойкие аустенитные стали 12X18H10T, 08X23H28M2T, 06X23H28M3ДЗТ (ЭИ-943) и иногда легированный чугун СЧ 28-48, которые успешно заменяют ранее используемый свинец [1]. Данные стали и сплавы (за исключением чугуна) также успешно используют для оборудования производств фосфорных удобрений, магния, в химической, черной, цветной и нефтехимической отраслях промышленности. Выбор высоколегированных сталей и сплавов основывался на их высоком сопротивлении воздействию кавитации в агрессивных средах в статических условиях.

Одним из типичных примеров являются хлорные компрессоры титано-магниевого производства, которые изначально поставлялись из Финляндии фирмой «Кархула» из чугуна. Срок службы их определялся стойкостью к кавитационно-эрозионному воздействию в присутствии абразивных частиц осадка. В это же время, для работы в условиях кавитации в агрессивных средах в присутствии абразивных частиц используют, как правило, данные по коррозионной стойкости в статической среде и не учитывают кавитацию, которая в данном случае играет решающую роль в кавитационно-эрозионном разрушении.

Анализ последних исследований и публикаций. Поскольку кавитационное разрушение развивается на поверхности детали, альтернативой объемному легированию является создание

¹ канд. техн. наук, ст. преподаватель, Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

² инженер, директор ООО «Производственно-научное объединение «Трубопроводы гидротранспорта»

³ канд. техн. наук, доцент, Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

⁴ канд. техн. наук, доцент, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

кавитационно-коррозионностойких наплавочных материалов с рациональной системой макро- и микролегирования, которые одновременно обладают повышенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами. Проведенные исследования [2-4] в Украине и за рубежом (Богачевым И.Н., Малиновым Л.С., Минцем Р.И., Векслером Ю.Г., Погодаевым Л.И., Разиковым М.И., Черной С.М. и др.) по разработке и использованию сплавов и наплавочных материалов для защиты металлических изделий от воздействия кавитации, коррозии и абразивного изнашивания, свидетельствуют о перспективности поиска в данном направлении.

Цель статьи – более глубокое изучение состава и свойств сталей аустенитного класса, а также разработка практических рекомендаций по созданию рациональных систем легирования и модифицирования наплавочных материалов, обладающих повышенным сопротивлением кавитационно-коррозионно-абразивному изнашиванию.

Изложение основного материала. С целью повышения кавитационно-коррозионно-абразивной стойкости деталей технологического оборудования титано-магниевого производства было предложено основные быстроизнашивающиеся детали изготавливать из стали 12Х18Н10Т с последующей возможностью восстановления их изношенной поверхности электродуговой наплавкой высоколегированными материалами аустенитного класса с требуемыми служебными свойствами.

Одновременно с этим, одним из способов повышения служебных свойств материала деталей (их кавитационно-коррозионно-абразивной стойкости) может служить:

- 1) дополнительное рациональное легирование основными элементами, которые в комплексе обеспечивают повышение механических свойств и стойкостных показателей наплавленного слоя;
- 2) измельчение структуры путем микролегирования элементами модификаторами;
- 3) повышение чистоты металла по вредным примесям;
- 4) образование в матричном аустените вторичных выделений избыточных фаз интерметаллидной природы, обеспечивающих увеличение стойкости наплавленного металла против микроударного воздействия среды за счет упрочнения матрицы.

Для дополнительного легирования наплавленного металла с целью повышения кавитационно-коррозионно-абразивной стойкости вводят основные легирующие компоненты: Cr, Ni, Mo, W. Данные элементы в комплексе обеспечивают не только ряд механических и служебных свойств, но и регулируют процессы структурообразования в процессе кристаллизации наплавленного металла. В связи с этим, рациональный выбор количественного содержания этих элементов и установление их влияния на изменение структуры наплавленной стали, является актуальной задачей. А ее решение дает возможность правильного выбора материала с повышенной износостойкостью.

На основании многочисленных исследований отечественных и зарубежных ученых установлено, что для придания металлу достаточной стойкости к образованию кристаллизационных трещин нужно иметь в аустенитном шве 2-5 % первичного феррита [1].

Общепризнанным является тот факт, что введение в состав высоколегированных коррозионностойких сталей (сплавов), в том числе и сварочных материалов, микродобавок редкоземельных металлов (РЗМ) не только модифицирует и рафинирует наплавленный металл, но и повышает сопротивление последним переходу в хрупкое состояние. В качестве редкоземельных элементов используют скандий, лантан и 14 лантаноидов, а также иттрий, который обладает свойствами РЗМ. Химические свойства их трудноразличимы. Очень близки и размеры их ионов. В частности, у иттрия и тяжелых элементов семейства лантаноидов – гадолиния, тербия, диспрозия, гольмия, эрбия, тулия – размеры трехвалентного иона практически одинаковы, разница составляет сотые доли ангстрема.

Особый интерес для процессов микролегирования вызывает иттрий, поскольку он определяет степень подвижности дислокаций, имеет высокую температуру кипения (3000 °С) и вступает при наплавке в реакцию, как на стадии капли, так и в сварочной ванне. Параллельно с этим, он в небольших количествах растворяется в железе и одновременно взаимодействует с кислородом и другими элементами, что обеспечивает рафинирование стали. Небольшие добавки иттрия улучшают многие свойства сталей и сплавов. Всего 0,1-0,2 % элемента № 39, добавленные в стали и сплавы аустенитного класса, делают их структуру более мелкозернистой [5].

Ранее установлено [6], что нанесение на поверхность стали эвтектического покрытия существенно повышает ее кавитационную стойкость в активных средах. Химический состав раз-

рабочих сталей и сплавов данного класса (патент Японии № 54-41531) следующий, масс. %: С - 0,15-0,50; Si - 0,50-3,00; Mn - 0,1-2,0; Cr - 22,0-30,0; Ni - 15,0-25,0; Mo - 1,0-4,0; W - 0,5-2,5; Nb - 0,2-1,0; N - 0,12-0,30; B - 0,03-0,05 (прототип)[7]. Эти стали и сплавы имеют удовлетворительный комплекс механических и коррозионных свойств для статических сред. Однако для работы в коррозионных средах при воздействии кавитации предъявляются более высокие требования по кавитационно-эрозионной стойкости, где в рабочей жидкости встречаются и абразивные частицы нерастворимых веществ.

Проведенные исследования и испытания показали, что для увеличения стойкости деталей, работающих в агрессивных средах в условиях кавитации, могут быть использованы коррозионностойкие двухфазные Fe-Cr-Ni-Mo стали эвтектического состава. Высокая кавитационно-коррозионная стойкость этих сталей обеспечивается аустенитной матрицей и высокодисперсной σ -фазой (эвтектика $\gamma+\sigma$). Особенно высокую стойкость в агрессивных средах при кавитации такие стали показали при создании на поверхности высокодисперсной эвтектики путем наплавки или оплавления поверхности неплавящимся вольфрамовым или др. электродом, а также лучом лазера в инертной среде.

Для этой цели был разработан следующий состав износостойкой стали (а.с. № 1407093), который отличается от известных сталей и сплавов отсутствием азота и ниобия при дополнительном легировании алюминием и иттрием, масс. %: С - 0,01-0,2; Si - 1,5-3,5; Mn - 0,1-2,0; Cr - 20,0-30,0; Ni - 10,0-20,0; Mo - 3,0-6,0; W - 0,05-20,5; Al - 0,2-0,4; Y - 0,005-0,1 (разработанная сталь).

При этом должны соблюдаться следующие соотношения:

$$\frac{[\%Cr]}{[\%Ni]} = 1,5 - 2,0; \quad (1)$$

$$13,6[\%Mo] + 5,1[\%Si] + 40,9[\%W + \%Al] = 100 \pm 15. \quad (2)$$

Условия (1) и (2) были получены на основе математической обработки экспериментальных данных по фазовому составу сталей. Получение однородной аустенитной структуры достигается при выполнении условия (1).

Влияние на склонность к образованию эвтектики вносит изменение концентраций таких легирующих элементов как молибден, кремний, вольфрам и алюминий. Поэтому фиксированный фазовый состав стали ($\gamma + 10...20$ % эвтектики) достигается при выполнении условия (2). Следовательно, условия (1) и (2) удобны для корректирования состава стали при проведении плавки.

Микролегирование иттрием очищает границы зерен от вредных примесей (серы и фосфора), уменьшает количество и размеры неметаллических включений, придает им глобулярную форму. Все это обеспечивает повышение технологической пластичности стали и оказывает положительное влияние на весь комплекс механических свойств. Наряду с рафинированием и десульфурацией металла микролегирование иттрием обеспечивает измельчение матричного аустенита и эвтектики ($\gamma+\sigma$) при быстром охлаждении отливки. Последнее достигается оплавлением тонкого слоя поверхности стали неплавящимся электродом или лучом лазера.

Измельчение σ -фазы, а соответственно и получение более дисперсной эвтектики, усиливается при совместном легировании иттрием и алюминием.

При содержании иттрия выше указанных пределов уменьшается пластичность сталей при ковке, поскольку излишнее количество иттрия не только связывает вредные примеси в химические соединения, но и остается в твердом растворе. Сосредотачиваясь преимущественно по границам первичных кристаллов, они действуют как примесь, ослабляющая границы зерен и приводящая к ухудшению деформируемости, уменьшению пластичности и снижению коррозионной стойкости. Легирование стали иттрием ниже предлагаемых количеств малоэффективно и практически не влияет на свойства стали.

Введение алюминия в соответствии с условием (2) совместно с иттрием приводит к измельчению эвтектики и обеспечивает требуемый фазовый состав стали.

Таким образом, введение алюминия и иттрия в сталь сообщает ей, кроме рафинирования, десульфурации и раскисления металла, дополнительные качества – фиксированный фазовый состав ($\gamma+10-20$ % σ), измельчение эвтектики ($\gamma+\delta$) и в целом литой структуры при быстром охлаждении.

Для оценки кавитационно-коррозионно-абразивной стойкости были изготовлены опыт-



Зона оплавления

Литой металл

Рисунок - Микроструктура литой и оплавленной поверхности разработанной стали

ные образцы. Стали для образцов выплавляли в открытых индукционных печах емкостью 10 и 100 кг. Расчетные количества иттрия вводили в виде металлического иттрия и алюмоиттрия. Слитки гомогенизировали при 1150 °С, 6 ч., затем разрезали на заготовки, которые закаливали от 1100 °С, 1 ч. Поверхность деталей оплавливали неплавящимся вольфрамовым электродом в инертной среде.

На рисунке представлена структура предлагаемой стали в литом состоянии и после оплавления поверхности.

Химический состав пяти опытных плавок разработанной стали, экстремумов по содержанию основных легирующих элементов, прототипа и стали эталона приведены в табл. 1.

Фазовый состав сталей в соответствии с номером плавки: 1 – $\gamma+20\%$ эвтектики в наплавленной стали; 2 – $\gamma+15\%$ эвтектики; 3 – $\gamma+10\%$ эвтектики; 4 и 5 – 100% γ .

Механические свойства, кавитационная и кавитационно-коррозионно-абразивная стойкость рассматриваемых сталей приведены в таблицах 2 и 3. Испытания производили на ударно-эрозионном стенде.

Таблица 1

Химический и фазовый состав исследуемых сталей

№ плавки	Содержание элементов, масс. %												
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	Al	Y	Nb	N	P	S
1	0,20	3,50	2,00	30,00	20,0	3,00	0,50	0,20	0,100	-	0,015	0,015	0,020
2	0,20	1,50	2,00	30,00	20,0	6,00	0,05	0,40	0,050	-	0,010	0,012	0,018
3 ¹	0,083	1,84	0,59	24,08	13,66	4,18	0,26	0,35	0,035	-	0,007	0,015	0,014
4 ²	0,214	0,75	1,01	28,54	15,93	2,11	0,66	-	-	0,48	0,150	0,020	0,021
5 ³	0,087	0,67	1,38	17,32	12,20	-	-	-	-	Ti-0,52	0,005	0,021	0,005

Таблица 2

Кавитационная и кавитационно-коррозионно-абразивная стойкость сталей

№ плавки	Сталь (закалка+наплавка)	Потери массы сталей за 10 ч, г					
		вода	42 %H ₃ PO ₄	Растворы H ₂ SO ₄			
				10 %	75 %	92 %	98 %
1	Разработанная	0,0374	0,0480	0,1561	0,1693	0,1944	0,1502
2		0,0367	0,0452	0,0930	0,0964	0,1101	0,0841
3		0,0290	0,0385	0,1002	0,1105	0,1423	0,0934
4	Прототип	0,1679	0,4573	0,9971	1,1412	1,2904	1,2760
5	Эталон (12X18H10T)	0,2367	0,5310	1,0728	1,2541	1,3924	1,2187

Примечание. Применительно к абразивному воздействию все растворы кислот содержали наличие нерастворимых абразивных частиц размером 50-70 мкм в среднем количестве 1-2 г/м³.

Приведенные свойства и результаты испытаний подтверждаются актами испытаний.

¹ 1-3 Разработанная сталь (закалка+наплавка)

² Прототип (закалка+наплавка)

³ Эталон 12X18H10T (закалка+наплавка)

Таблица 3

Механические свойства исследованных сталей

№ плавки	Сталь (закалка+наплавка)	σ_B	$\sigma_{0,2}$
		МПа	
1	Разработанная	510	300
2		540	320
3		560	380
4	Прототип	480	260
5	Эталон (12X18H10T)	430	220

Как видно из таблиц, разработанная сталь превосходит прототип и эталон по характеристикам прочности, ударной вязкости и кавитационной стойкости в воде и в растворах кислот с частицами абразива. Повышенная кавитационно-коррозионно-абразивная стойкость в агрессивных средах обеспечивается, в первую очередь, оптимальным легированием и благоприятной структурой и, как следствие, высокими механическими свойствами стали.

Выводы

Применение разработанной стали в качестве кавитационно – коррозионно - абразивно-стойкого материала в литом и оплавленном состояниях для работы в условиях кавитации в агрессивных средах взамен прототипа и базовой стали (эталона) обеспечивает следующие преимущества:

1. Повышение прочностных свойств сталей, обеспечивает повышение надежности и служебных характеристик изделий, позволяет снизить металлоемкость изделий.

2. Повышение кавитационно-эрозионно-абразивной стойкости в серной кислоте в 5-10 раз позволяет продлить срок службы хлорных компрессоров, уменьшить затраты на ремонт; кроме того, увеличение надежности хлорных компрессоров уменьшает вероятность выбросов хлора в атмосферу и, соответственно, загрязнения окружающей среды.

3. Натурные испытания показали, что ресурс работы конусов и роторов хлорных компрессоров из разработанной стали увеличился в 3 раза.

Полученный комплекс свойств позволяет применять разработанную сталь для изготовления деталей машин и аппаратов, работающих в условиях кавитации в агрессивных средах (насосы, запорная арматура, системы транспортирования, компрессоры и т.д.).

Результаты испытаний показали, что стойкость против кавитационно-коррозионно-абразивного разрушения заявляемой стали в серной кислоте оказалось в 10 раз выше стойкости стали 12X18H10T и в 5-6 раз выше стойкости сплава 06X23H28M3Д3Т, применяемых в настоящее время для указанных целей, и в 5 раз выше стойкости стали-прототипа, как в литом, так и в оплавленном по тем же режимам состоянии.

Список использованных источников:

1. Багрянский К.В. Теория сварочных процессов / К.В. Багрянский, З.А. Добротина, К.К. Хренов. – К. : Высшая школа, 1976. – 423 с.
2. Богачев И.Н. Новые кавитационностойкие стали для гидротурбин и их термообработка / И.Н. Богачев, Л.С. Малинов, Р.И. Минц. – М. : НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1967. – 47 с.
3. Разиков М.И. Сварка и наплавка кавитационностойкой стали марки 30X10Г10 / М.И. Разиков, С.Л. Миличенко, В.И. Ильин. – М. : НИИМАШ, 1964. – 35 с.
4. Чернега С.М. Вплив структури та фізико-механічних характеристик на закономірності кавітаційного зношення евтектичних матеріалів / С.М. Чернега, О.І. Тріщун, О.В. Тісов // Проблеми тертя та зношування. – 2006. – Вип.45. – С.97-106.
5. Популярная библиотека химических элементов / И.В. Петрянов-Соколов [и др.]. – М.: Наука, 1983. – 575 с.
6. Голубец В.М. Стойкость эвтектических покрытий к кавитационно-эрозионному изнашиванию / В.М. Голубец // Трение и износ. – 1985. – Т.6. – №2. – С.318–323.
7. Заявка 54-41531 Япония, МКИ⁵ С 22 С 38/54,58. Сталь.

Рецензент: Л.С. Малинов
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 22.04.2010