

ЭРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ХРОМОНИКЕЛЬКРЕМНИСТОГО МЕТАЛЛА ПРИ НАПЛАВКЕ В РАЗЛИЧНЫХ ЗАЩИТНЫХ СРЕДАХ

Ю.И. ЛОПУХОВ

Восточно-Казахстанский гос. техн. ун-т. 070002, Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. 30-й Гвардейской дивизии, 34.
E-mail: kanc_ekstu@mail.ru

Трубопроводная арматура при эксплуатации должна обладать эрозионной стойкостью уплотнительных поверхностей. С этой целью их подвергают механизированной дуговой наплавке с получением высоколегированного хромоникелькремнистого наплавленного металла. Дальнейшее повышение эрозионной стойкости может быть достигнуто дополнительным легированием наплавленного металла азотом. В работе представлены результаты сравнительных испытаний наплавленного металла на стойкость против задиры при наплавке порошковой проволокой в среде аргона, углекислого газа, азота и смеси азота с углекислым газом. Наилучшими показателями эрозионной стойкости обладает наплавленный металл, полученный при наплавке в среде смеси азота и углекислого газа. Библиогр. 2, табл. 3, рис. 1.

Ключевые слова: дуговая наплавка, смесь защитных газов, трубопроводная арматура, уплотнительные поверхности, порошковая проволока, хромоникелькремнистый наплавленный металл, эрозионная стойкость

Для механизированной износостойкой наплавки под флюсом и в аргоне уплотнительных поверхностей деталей трубопроводной арматуры применяются порошковые проволоки ПП-АН133 (тип 10X17H8C5Г2Т), ПП-АН157 (тип 10X19H9C5M2PГТ). Эти материалы намного дешевле по сравнению с дефицитными кобальтовыми стеллитами, которые находят все большее применение в отрасли взамен электродов ЦН-6Л, ЦН-12М. Наплавленный металл сохраняет достаточно высокую стойкость против коррозионного и эрозионного изнашивания и задиранья в пароводяной среде высоких параметров и сохраняет свои характеристики в течение длительного срока эксплуатации. Исследования и опыт применения этих сталей свидетельствует, что наплавленные покрытия с более высоким уровнем твердости показывают более высокую противозадырную стойкость. Однако стойкость их против трещинообразования при этом падает, особенно резко при твердости свыше 45 HRC [1].

Твердость наплавленных хромоникелевых сталей заметно зависит от наличия в их составе легирующих элементов — кремния и хрома, от количества ферритной фазы и степени ее распада при нагреве. Поэтому приходится жестко регламентировать температурно-временные режимы наплавки и нагрева деталей, включая и режим последующей термообработки. Незначительное отклонение химического состава наплавленного металла по хрому и, особенно, по кремнию существенно снижает его эксплуатационные характеристики [1, 2]. В результате дисперсионного твердения образуется сигма фаза, что приводит к охрупчиванию

наплавленного металла и образованию в нем трещин. Большую роль играют температурно-временные условия при наплавке массивных деталей и старение сплава при длительных тепловых нагрузках на тепловых электрических станциях с температурой рабочей среды 450...600 °С, что в целом снижает служебные свойства сплава [2].

С целью оценки возможности повышения эксплуатационных характеристик проводили исследование по влиянию легирования азотом на изменение физико-механических свойств сплавов 10X17H8C5Г2Т, 10X9H9C5M2PГТ в зависимости от температуры отпуска, стойкости к задиру и эрозионной стойкости. Наплавку проводили в среде аргона и азотсодержащей атмосфере $N_2 + CO_2$.

Механические свойства. Испытания образцов на ударный изгиб проводились на маятниковом копре КМ-0,3 с оптоэлектронной системой регистрации энергии разрушения. Полный запас потенциальной энергии маятника составлял 300 Дж. Потери на трение в оси маятника во всех случаях не превышали 0,4 %. Испытания проводились на образцах типа 1 по ГОСТ 9454–78 с V-образным надрезом. Твердость наплавленных образцов при нормальной температуре определяли на твердомере ТК-2 при нагрузке 0,29 кг и выдержке 30 с. Фактографические исследования поверхности образцов, полученных от разрушений при испытаниях на ударную вязкость, проводили на растровом электронном микроскопе JSM-6390LV.

Исследования механических свойств азотсодержащего наплавленного металла (табл. 1) показывают, что азот повышает прочность и ударную вязкость исследуемых сплавов.



Таблица 1. Механические свойства Cr–Ni–Si наплавленного металла

Наплавленный металл	Защитная атмосфера	Режим термообработки	σ_b , МПа	KCV, Дж/см ²
10X17H8C5Г2Т	Ar	Исходное состояние	$\frac{88,2-92,5}{90,3}$	$\frac{5,2-5,6}{5,5}$
		Отпуск 650 °С, 3 ч	$\frac{86,0-90,6}{88,3}$	$\frac{5,0-5,6}{5,3}$
		Отпуск 850 °С, 3 ч	$\frac{66,8-77,2}{72,0}$	$\frac{2,8-4,6}{3,7}$
		Старение 650 °С, 1000 ч	$\frac{62,4-68,3}{65,4}$	$\frac{0,25-1,1}{0,67}$
10X17H9C5Г2Т	70 % N ₂ + 30 % CO ₂	Исходное состояние	$\frac{94,2-115,0}{104,6}$	$\frac{10,6-12,4}{11,5}$
		Отпуск 650 °С, 3 ч	$\frac{80,0-100,5}{90,2}$	$\frac{8,8-11,5}{9,9}$
		Отпуск 850 °С, 3 ч	$\frac{68,2-78,4}{73,0}$	$\frac{5,6-6,4}{6,0}$
		Старение 650 °С, 1000 ч	$\frac{63,8-67,9}{65,6}$	$\frac{2,3-3,8}{3,5}$
10X9H9C5M2ГРТ	Ar	Исходное состояние	$\frac{86,0-99,2}{92,6}$	$\frac{3,5-5,2}{4,4}$
		Отпуск 650 °С, 3 ч	$\frac{78,8-92,0}{85,4}$	$\frac{3,1-4,6}{3,9}$
		Отпуск 850 °С, 3 ч	$\frac{79,8-94,0}{86,9}$	$\frac{2,6-4,2}{3,4}$
		Старение 650 °С, 1000 ч	$\frac{71,2-84,6}{77,9}$	$\frac{3,1-4,6}{3,9}$
10X19H9C5M2ГРТ	70 % N ₂ + 30 % CO ₂	Исходное состояние	$\frac{89,0-99,8}{94,4}$	$\frac{4,8-7,0}{5,9}$
		Отпуск 650 °С, 3 ч	$\frac{79,4-94,0}{86,7}$	$\frac{4,1-6,3}{5,2}$
		Старение 650 °С, 1000 ч	$\frac{71,2-85,4}{78,3}$	$\frac{3,1-4,6}{3,9}$

Исследование фрактограмм разрушенной поверхности образцов после испытания на ударную вязкость (рисунок) показывает, что наплавка в атмосфере 30 % N₂ + 70 % CO₂ приводит к существенному увеличению доли вязкой составляющей в изломе в сравнении с аргоном (рис., б). При этом излом стали можно охарактеризовать как вязкий чашечный с отдельными включениями участков хрупкого скола.

В металле, наплавленном в смеси 70 % N₂ + 30 % CO₂, доля вязкой составляющей повышается и дисперсность структуры остается на достаточно

высоком уровне (рис., в), что обеспечивает более высокие значения ударной вязкости.

Дальнейшее увеличение процентного содержания в смеси азота (свыше 70 %) приводит к увеличению склонности материала к хрупкому разрушению.

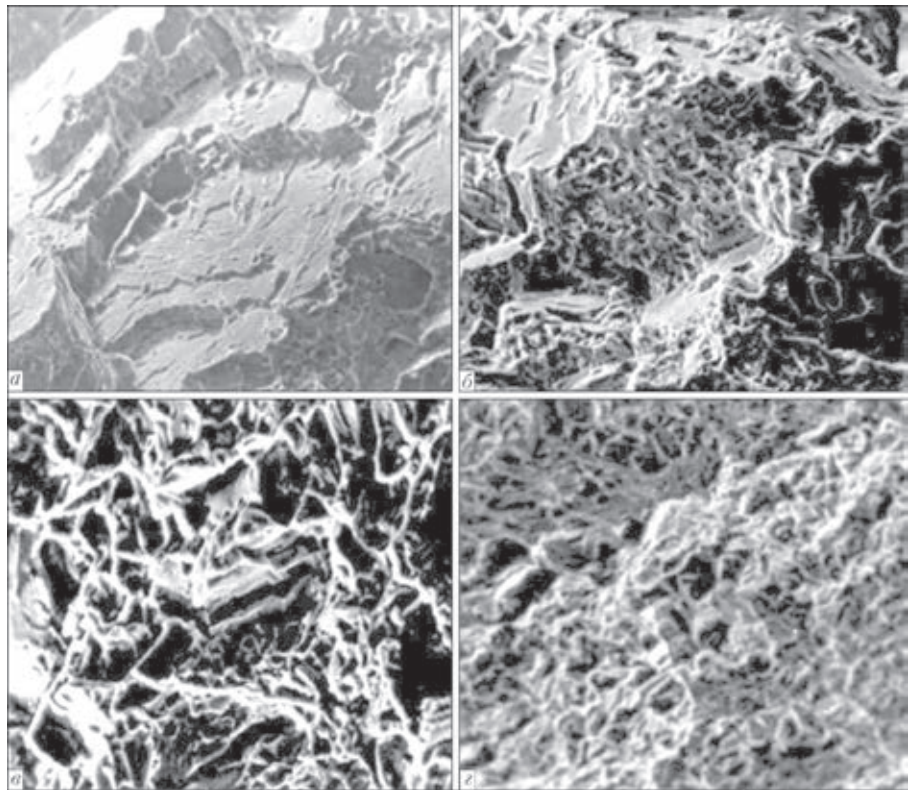
Металл, наплавленный в атмосфере 100 % азота, одновременно упрочняя аустенит приводит к охрупчиванию. Об этом свидетельствует появление на поверхности излома площадок скола с ярко выраженной кристаллографической ориентацией (рис., г).

Испытания на стойкость к задиранию. С целью получения сопоставимых данных по служебным свойствам наплавочных материалов уплотнительных поверхностей затворов энергетической арматуры, проводили комплексные экспериментальные исследования сплавов на склонность к образованию задилов и эрозии при параметрах среды и условиях, близких к рабочим.

Испытания на стойкость к задиранию проводились в среде пара при температуре 350 °С и удельном давлении 80...100 МПа на специализированном стенде.

Исследовались сплавы 10X17H8C5Г2Т и 10X19H9C5M2PГГ, полученные наплавкой соответственно проволоками ПП-АН133 и ПП-АН157 в защитных газах или их смесях — Ar, CO₂, N₂, CO₂ + N₂. Исследование материалов на стойкость к задиранию проводили путем моделирования процесса контактного силового воздействия на уплотнительные поверхности деталей затвора арматуры. Минимальная удельная нагрузка, при которой начинали испытания, составляла 10 МПа. Затем нагрузку повышали ступенчато через 10 МПа до наступления задира или достижения заданной величины удельного давления. После испытания определяли площадь контакта (трения) образцов и глубину задирания. Измерения проводили с помощью микроскопа МИС-11. Критерием стойкости к задиранию условно принимали появление на рабочей (контактной) поверхности образцов задилов глубиной 10 мкм и более. Удельную нагрузку, вызывающую задиры указанной величины, считали максимально допустимой для данного материала.

Из представленных данных (табл. 2) следует, что все пары образцов сплава 10X17H8C5Г2Т, кроме образцов, наплавленных в атмосфере аргона, обладают достаточно высокой стойкостью против образования задилов при удельных давлениях 91,2...96,6 МПа, но наилучшими свойствами обладает металл, наплавленный проволокой ПП-АН133 в



Эволюция вида излома при наплавке порошковой проволокой ПП-АН133 (×580). Защитная атмосфера: а — Ar; б — 30 % N₂ + 70 % CO₂; в — 70 % N₂ + 30 % CO₂; z — N₂ атмосферах 50 % N₂ + 50 % CO₂ (96,0 МПа) и 70 % N₂ + 30 % CO₂ (96,6 МПа).

При испытании разноименных пар образцов 10X17H8C5Г2Т + 10X19H9C5M2PГГ высокие противозадирные свойства зарегистрированы в металле, наплавленном соответствующими проволоками в смеси газов 70%N₂ + 30% CO₂.

Противозадирные свойства одноименной пары из сплава 10X17H8C5Г2Т, легированного азотом, не уступают этим свойствам при испытании разноименных пар 10X17H8C5Г2Т + 10X19H9C5M2PГГ. Повышение противозадирных свойств наплавленного металла связано с получением более однородной структуры при наплавке в азотсодержащих средах. В структуре сплавов, легированных азотом, изменяется количественное соотношение α- и γ-фаз в сторону увеличения аустенита. Сплав

Таблица 2. Противозадирные свойства исследуемых сплавов

Тип сплава исследуемых пар образцов	Защитный газ при наплавке, %	Твердость, HRC	Удельные нагрузки, вызывающие задиры более 10 мкм, МПа
10X17H8C5Г2Т	100 Ar	36	57,7
	100 CO ₂	32	71,2
	100 N ₂	36	93,0
	50N ₂ + 50CO ₂	35	96,0
	70CO ₂ + 30N ₂	33	93,0
	70N ₂ + 30CO ₂	35	96,6
10X17H8C5Г2Т (нижний)	100 N ₂	32/36	70,0
10X19H9C5M2PГГ (верхний)	70N ₂ + 30CO ₂	35/38	77,0



Таблица 3. Эрозионные свойства стали 10X17H8C5Г2Т

Сталь	Защитный газ при наплавке, %	Параметры испытаний			Результаты испытаний			
		Давление, МПа	$T^{\circ}\text{C}$	Время испытаний, ч	Глубина износа, мкм	Скорость износа, мкм/ч	КОЭС	
10X17H8C5Г2Т	100Ar	17,0	200	254	15,95	0,064	1,03	
		18,5	180	196	15,32	0,052	0,88	
		18,5	180	196	9,32	0,047	0,97	
	50N ₂ + 50CO ₂	17,0	200	254	12,15	0,051	1,29	
		18,5	180	196	7,21	0,033	1,39	
	70CO ₂ + 30 N ₂	17,0	200	254	13,06	0,053	1,24	
		18,5	180	196	7,52	0,035	1,31	
	30CO ₂ + 70 N ₂	17,0	200	254	12,33	0,032	2,06	
		18,5	180	196	6,15	0,051	1,40	
		18,0	180	196	10,86	0,049	1,53	
	12X18H10Т	—	17,0	200	254	16,8	0,066	1,00
			18,5	180	196	8,7	0,046	1,00

10X17H8C5Г2Т, легированный азотом из газовой фазы, характеризуется образованием мелкодисперсных равномерно распределенных карбонитридных частиц в аустенитной матрице, что вызывает эффект упрочнения.

Испытания на эрозионную стойкость. Рабочей средой являлась вода (18 МПа, 210 °С), питающая котлы промышленной ТЭЦ. Испытаниям подвергались одновременно несколько пар образцов, из которых не менее, чем в трех находились образцы из исследуемого материала. Скорость среды в щели $0,3 \times 3$ мм² между исследуемым верхним образцом и нижним из стали типа 12X18H10Т составляла около 100 м/с. Параметры среды поддерживались и регистрировались в процессе эксперимента системой КИП, состав среды контролировали отбором химических проб на ТЭЦ и испытательном стенде.

Степень кавитационно-эрозионного разрушения исследуемых образцов определялась взвешиванием их на аналитических весах до и после испытаний с точностью $\pm 0,0001$ г. Кроме этого, рабочая поверхность образцов, находящихся в щелевом потоке воды, оценивалась по среднему значению глубины износа. Измерения производили в девяти точках исследуемой поверхности.

Одновременно с образцами из исследуемого материала при каждом эксперименте устанавливали также в качестве исследуемого верхний образец из стали типа 12X18H10Т, уровень эрозионной стойкости которого принят за единицу. Коэффициент относительной эрозионной стойкости (КОЭС) рассчитывали как отношение численных значений скорости эрозии эталонного и исследуемого материалов. Ито-

говые показатели определяли как среднее арифметическое из значений относительной эрозии испытанных пар образцов.

Средняя скорость эрозии определялась как отношение средней глубины эрозионного разрушения \bar{h} в единицу времени τ $i = \bar{h} / \tau$ мкм/ч. Для сравнительной оценки стойкости против эрозии исследуемых наплавочных материалов испытания проводили при изменяющихся параметрах среды. Из приведенных результатов (табл. 3) следует, что все исследуемые варианты сплавов, полученных наплавкой проволокой ПП-АН133 в азотсодержащих атмосферах, обладают высокой эрозионной стойкостью.

Сравнительные характеристики показали, что лучшими показателями эрозионной стойкости обладает металл, наплавленный проволокой ПП-АН133 в среде 70 % N₂ + 30 % CO₂ и 50 % N₂ + 50 % CO₂.

Фазовый состав наплавленного металла существенно влияет на эрозионные свойства. С увеличением содержания доли аустенита легированного азотом, возрастает эрозионная стойкость стали. Повышение эрозионных свойств азотсодержащего наплавленного металла также, по-видимому, связано с образованием мелкодисперсных нитридов с решеткой, когерентной решетке аустенита и обеспечивает в ней их прочное зацепление.

1. Степин В.С., Старченко Е.Г., Андреев А.А. Применение дисперсно-твердеющих Cr-Ni-Si сталей для элементов затворов и наплавки уплотнительных поверхностей арматуры ТЭС и АЭС // Арматуростроение. – 2006. – № 3. – С. 66–69.
2. Лопухов Ю.И. Формирование структуры хромоникель-кремнистой стали в условиях газозлектрической дуговой наплавки // Физическая инженерия поверхности. – 2009. – 7, № 1-2. – С. 27–30.

Поступила в редакцию 15.04.2015