

ФОРМИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ ПРИ НАПЛАВКЕ ВЫСОКОАЗОТИСТОЙ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ НА МАЛОУГЛЕРОДИСТУЮ СТАЛЬ

Капуткин Д. Е.

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва,
Россия, kaputkin@misis.ru*

Наплавка на поверхность стали слоя иного химического состава позволяет резко изменить свойства поверхности изделия, повысить его прочность, твердость, износо- и коррозионную стойкость. Азотсодержащие стали в ряде случаев имеют более высокие свойства, чем схожие по составу безазотистые (см., например, [1–3]). Поэтому наплавка таких сталей представляется весьма интересной и перспективной.

В настоящей работе материалом основы служила углеродистая сталь с 0,147 мас.% С, а наплавляемый материал представлял собой сплав Fe–Cr–(Ni, Mn)–N–C (табл. 1). Содержание азота в шихте во всех вариантах наплавки превышало равновесное – то есть предел растворимости азота в жидком металле при атмосферном давлении и температуре, близкой к температуре ликвидус исследованных сталей. В варианте 1 электродом служила пластина из стали X18A1 (Fe – 18%Cr – 1%N). В остальных случаях легирующие элементы (кроме углерода) вводили в виде порошков феррохрома (Fe – ~70%Cr), ферромарганца (Fe – 70%Mn), нитрида хрома CrN, стали X18H10 (Fe – 18%Cr – 10%Ni) и сплава X20H80 (20%Cr – 80%Ni) соответственно, смешанных с жидким стеклом и помещенного в лоток из стали Ст.3. Электрошлаковую наплавку (ЭШН) [4] проводили на постоянном токе обратной полярности под флюсом АН-348-А [5]. Также были исследованы состав и структура материала, получающегося при перекрытии наплавленных слоев: вариант 7 получен двухслойной ЭШН тем же электродом, что и 6.

Таблица 1. Химический состав электрода и наплавленного металла, мас.% (Fe – основа)

№	Состав электрода, % по массе	Электрод					Расположение шихты в элек- троде	Наплавленный металл				
		Cr	Mn	Ni	N	C		Cr	Mn	Ni	N	C
1	Сталь X18A1-100	18	-	-	1	-	Электрод - пла- стина	10,0	-	-	0,136	0,040
2	Ст.3 – 50; FeMn – 24; FeCr – 16; CrN – 10	20	16,5	-	2	0,2	Сверху	3,3	11,2	-	0,047	0,223
3	Ст.3 – 50; FeMn – 24; FeCr – 16; CrN – 10	20	16,5	-	2	0,2	Снизу	5,4	16,8	-	0,058	0,294
4	Ст.3 – 39,5; FeCr – 3,5; X18H10 – 50; CrN - 5	16	-	5,0	1	0,2	Сверху	5,3	-	2,3	0,132	0,136
5	Ст.3 – 39,5; FeCr – 4,9; X18H10 – 52,6; CrN - 3	16	-	5,3	0,6	0,2	Сверху	9,4	-	4,0	0,171	0,112
6	Ст.3 – 75,4; FeCr – 15; X18H80 – 50; CrN – 3	16	-	5,3	0,6	0,2	Сверху	7,8	-	3,6	0,184	0,271
7	Ст.3 – 75,4; FeCr – 15; X20H80 – 6,6; CrN – 3	16	-	5,3	0,6	0,2	Сверху Двухслойная ЭШН	10,0	-	4,6	0,167	0,121

Химический анализ показал, что в ходе ЭШН происходит снижение (по сравнению с материалом электрода) до равновесных значений концентрации азота в наплавленном материале (см. табл. 1). Важно отметить, что чем больше была концентрация азота в шихте, тем меньше его остается в наплавленном материале (ср. варианты 4 и 5 – см. табл. 1). Одновременно со снижением концентрации азота в наплавленном мате-

риале снижается концентрация и других легирующих элементов. Повышение содержания нитрида хрома в шихте приводит к дополнительному снижению концентрации легирующих элементов в наплавленном металле: например, концентрации Cr и Ni в материале после ЭШН по варианту 4 в 1,75 раза ниже, чем по варианту 5, а состав шихты в этих вариантах ЭШН отличается практически только по содержанию CrN (см. табл. 1). Поскольку слой шлака, куда уходят легирующие элементы при наплавке, находится выше металла, то размещение порошков в электроде снизу лотка из стали способствует сохранению легирующих элементов в наплавленном металле (концентрации Cr и Mn в варианте 3 выше, чем в варианте 2). При этом следует отметить, что флюс АН-348-А относится к группе активных восстановительных высококремнистых высокомарганцовистых оксидных флюсов, под которыми при сварке и наплавке безазотистых сталей хром не покидает расплавленный металл, а марганец даже переходит из флюса в металл [5]. Однако удержать легирующие элементы, уносимые сверхравновесным азотом, слой этого флюса не может.

В ходе ЭШН имеет место частичное перемешивание материалов наплавки и основы. В связи с этим, концентрация углерода в наплавленном металле может быть выше, чем в шихте. Это перемешивание также способствует снижению концентрации легирующих в наплавленном металле. Поэтому при двухслойной наплавке (вариант 7) концентрации хрома и никеля в два раза выше, а углерода - ниже, чем при однослойной наплавке в тех же условиях (вариант 6).

При кристаллизации наплавленных материалов имеет место дендритная ликвация легирующих элементов. В наплавленном слое дендриты вытянуты перпендикулярно

плоскости наплавки, в зоне перемешивания – параллельно этой плоскости. Во внутренних зонах дендритов химическое травление выявляет пластинчатую структуру, а структура внешних зон дендритов не выявляется. В некоторых случаях в наплавленном металле выявляется протекание вторичной кристаллизации при охлаждении [6]. Рентгенографические исследования показали, что при охлаждении после однослойной ЭШН во всех случаях проходит мартенситное превращение и в структуре присутствуют мартенсит, остаточный аустенит и, в некоторых случаях: варианты 1, 2, 3, 5, – небольшое количество (не более 1-2 об.%) карбидных и/или нитридных фаз (табл. 2). Малая объемная доля фаз внедрения в некоторых случаях не позволила их идентифицировать. Объемные доли остаточного аустенита, оцененные по интегральным интенсивностям дифракционных максимумов аусте-

Таблица 2. Фазовый состав и твердость HV10 наплавленного металла.

№ варианта ЭШН	ФАЗЫ	Доля остаточного аустенита, об. %	HV10, МПа
1	$\alpha' + \gamma + \text{Cr}_2\text{N}$ (CrN)	7-9	4200
2	$\alpha' + \gamma + \theta + \text{Fe}_{2-3}\text{N}$	60-93	3800
3	$\alpha' + \gamma + \theta$	2-7	4800
4	$\alpha' + \gamma$	5-35	3900
5	$\alpha' + \gamma + \text{Cr}_2\text{N}$	13-68	3200
6	$\alpha' + \gamma$	1-3	4800
7	$\alpha' + \gamma$	4-5	4500/2800

Примечания: 1) α' – мартенсит; 2) γ – остаточный аустенит; 3) θ – цементит; 4) для объемной доли остаточного аустенита приведены значения по нескольким измерениям; 5) погрешность измерения твердости составляет 150 МПа; 6) для варианта 7 фазовый состав приведен для первого наплавленного слоя, значение твердости в числителе приведено для первого наплавленного слоя, а в знаменателе – для второго.

нита, мартенсита и фаз внедрения [7] (см. табл. 2), сильно зависят от содержания легирующих элементов в наплавленном металле. Так, снижение концентрации Cr до 3,3% при 11,2%Mn и 0,270%(N+C) в материале после ЭШН по варианту 2 повлекло за собой

резкую стабилизацию остаточного аустенита по сравнению с вариантом 3, где хрома на 65% больше. При анализе фазового состава исследуемых материалов необходимо учитывать, что из-за дендритной ликвации концентрация легирующих элементов и, следовательно, соотношение фаз в различных зонах дендритов может сильно различаться.

Твердость наплавленного металла (см. табл. 2) выше, чем твердость основы, равная 1500 МПа. Значения твердости наплавленных материалов определяются их фазовым составом: чем больше доля мартенсита, тем выше твердость. Наплавленный металл обладает более низкой теплопроводностью, чем малоуглеродистая сталь основы, поэтому во втором слое в варианте 7 при охлаждении после ЭШН не прошло мартенситное превращение, и его твердость оказалась значительно ниже, чем у первого.

Использование различных шихтовых материалов для ЭШН при одинаковом общем химическом составе шихты (варианты 4, 5 и 6) привело к значительным различиям в химическом составе, структуре и свойствах наплавленного материала. Поскольку сталь X18H10 имеет температуру ликвидус (1743 К) выше, чем у сплава X20H80 (1663 К [8]), то никельсодержащие компоненты в варианте 5 в ходе ЭШН плавятся позже, чем в варианте 6 и пребывают в расплаве меньшее время. В результате, по-видимому, распределение никеля в вариантах 4 и 5 менее однородно, чем в варианте 6, то есть присутствуют локальные зоны, более обогащенные никелем по сравнению с его средней концентрацией в наплавленном материале. Это и является причиной большей объемной доли остаточного аустенита и меньшей твердости материала, наплавленного по вариантам 4 и 5, по сравнению с вариантом 6. Для повышения однородности наплавленного материала при ЭШН, по-видимому, легирующие элементы (в частности, Ni) необходимо вводить в наиболее легкоплавкой форме.

Список литературы

1. V.G.Gavriljuk, H.Berns. High nitrogen steel: structure, properties, manufacture, applications. Springer, 1999, 378 p.
2. О.А.Банных, В.М.Блинов, М.В.Костина Структура и свойства низколегированных высокоазотистых мартенситных сталей. // Металловедение и термическая обработка металлов. - 2003. - №2. - с. 3-8.
3. V. Prokoshkina, L. Kaputkina, A. Svyazhin, J. Siwka. Structure formation and strengthening of hot deformed nitrogen-containing steels// Advances in Science and Technology. 2008, Vol. 56 – pp 116-121.
4. О.А.Банных, В.М.Блинов, Д.Е.Капуткин, Ю.Н.Сараев. Структура и твердость материала, полученного наплавкой высокоазотистой коррозионностойкой стали на малоуглеродистую сталь. // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. Украина, Запорожье. - 2001, N 2. - с.25-28.
5. Б.П. Конищев, С.А. Курланов, Н.Н. Потапов, В.Д. Ходаков. Сварочные материалы для дуговой сварки: Справочное пособие: в 2-х т. Т.1. Защитные газы и сварочные флюсы. / Под общей ред. Н.Н. Потапова. // М.: Машиностроение. - 1989.
6. Мовчан Б.А. Границы кристаллитов в литых металлах и сплавах. // Киев: Техніка, 1970. – 212 с.
7. С.С. Горелик, Л.Н. Расторгуев, Ю.А. Скаков. Рентгенографический и электроннооптический анализ. // М.: МИСиС. -1994.
8. Н.И. Ганина, А.М. Захаров. Диаграммы состояния металлических систем. // М.: ВИНТИ. - 1987.