

Methodical approaches are stated; technological parameters of process of putting a wearproof corundum coating on inner surface of metal pipes by SHS method in centrifugal force field are defined. Calculations of change standard Gibbs mole energy for all possible reactions between charge components for finding-out what of these reactions can theoretically proceed spontaneously are performed. For determination of charge power ability calculations of thermal effects (enthalpy) corresponding reactions also are performed. Heat processes between a metal pipe and products of exothermic reactions at corundum layer formation are considered. Pre-production models of elements of the steel pipeline with corundum overlay are received, the covering material is investigated.

УДК 669.35.669.12.669.018.25

Е. Н. Парахневич, В. В. Лунев, В. П. Пирожкова, Л. К. Чеботарь, Н. М. Бурова

Запорожский национальный технический университет, Запорожье

## Морфология сульфидных включений в металле электрошлаковой наплавки

Рассмотрены процессы трансформации неметаллических включений и структуры в металле электрошлаковой наплавки с повышенным содержанием серы. Установлено, что в зонах сплавления формируется другая форма неметаллических включений и иная микроструктура.

**Ключевые слова:** электрошлаковая наплавка, неметаллические включения, сера, микроструктура, зона сплавления

### Введение

Сера, как известно [1, 2], является вредной примесью, образует легкоплавкие эвтектические сульфиды, выделяющиеся по границам зерен, что приводит к охрупчиванию металла, образованию кристаллизационных трещин и в целом – к снижению физико-механических свойств.

Для снижения вероятности образования кристаллизационных трещин в металл вводят различные присадки – десульфураторы. Более интенсивная десульфурация металла (до 60 %) [3] наблюдается после электрошлакового переплава.

**Результаты исследования.** В настоящей работе проведено сравнительное исследование микроструктуры и природы неметаллических включений (НВ) в металле, наплавленном электрошлаковым способом с повышенным содержанием серы. Варианты наплавки приведены в таблице.

Опытный металл выплавляли в индукционной печи емкостью 60 кг с основной футеровкой. Высокие концентрации серы обеспечивались вводом в металл сернистого железа, содержащего 32 % S. Конечное раскисление производили 0,2 % Al.

Наплавки проводили на установке А-550М с

применением стандартного шлака АНФ-6 (в %,  $\text{CaF}_2$  – 65-70;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 23-31;  $\text{CaO}$  – 8;  $\text{SiO}_2$  – 2,5;  $\text{FeO}$  – 0,5), обеспечивающего высокую десульфурацию.

В качестве расходных электродов использовали литые заготовки из сталей марок 45 (0,08 % S) и 12X13 (0,06 % S) сечением 60 мм, Ø кристаллизатора 100 мм.

Зоны сплавления однородных и разнородных по химическому составу сталей выявляли на полированных шлифах с использованием методов химического и теплового травления [4].

Микроструктуру исходного и наплавленного металла, в том числе и зоны сплавления, исследовали на световых оптических микроскопах МИМ-8 и «EpiQuant» при увеличениях 100-1000. Изменения микроструктуры фиксировали замерами микротвердости с помощью микротвердомера ПМТ-3 (таблица).

Распределение элементов в зонах сплавления определяли на растровом электронном микроскопе JSM-6360. Природу неметаллических включений изучали металлографическим и петрографическим методами. Определение поэлементного состава

## Химический состав сталей, наплавленных электрошлаковым способом

Номер варианта	Вариант наплавки	Содержание элементов, %						
		C	Cr	Mn	Si	Ni	P	S
I	сталь 45, наплавка	0,40	0,18	0,18	0,11	0,007	0,017	0,030
	сталь 45, основа	0,38	–	0,16	0,03	–	–	0,080
II	12X13, наплавка	0,13	11,86	0,20	0,24	–	0,015	0,040
	сталь 45, основа	0,21	–	0,16	0,03	–	–	0,080
III	12X13, наплавка	0,14	10,62	0,26	0,19	–	0,015	0,030
	12X13, основа	0,15	14,00	0,26	0,29	–	–	0,060
IV	сталь 45, наплавка	0,39	0,66	0,18	0,11	0,07	0,022	0,015
	12X13, основа	0,15	14,00	0,26	0,29	–	–	0,060

включений производили микрорентгеноспектральным методом на микрозонде MS-46 фирмы «CAMECA» и на растровом электронном микроскопе «Supra 40WDS».

Проведенные исследования показали, что структура основного и наплавленного металла в процессе электрошлаковой наплавки (ЭШН) трансформируется – изменяются химический состав и морфология всех структурных составляющих, в том числе и НВ.

*Вариант I.* Исходный металл (сталь 45) характеризуется феррито-перлитной зернистой структурой и наличием НВ: эвтектических сульфидов, окисульфидов и оксидов изометричной формы (рис. 1). По мере приближения к зоне сплавления (переходная зона) характер микроструктуры и НВ изменяется. Элементы структуры укрупняются, теряется зеренное строение. Ферритная составляющая приобретает блочно-пластинчатый характер с элементами Видманштетта. Подавляющее большинство включений растворяется полностью или частично. Оставшиеся частицы неметаллической фазы приобретают округлую форму.

Зона сплавления отличается пластинчато-иголь-

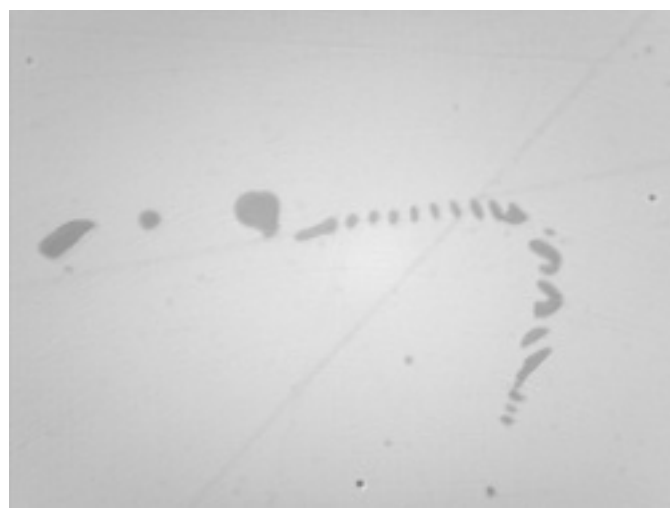


Рис. 1. Эвтектические сульфиды в исходном металле (сталь 45), ×900

тельно меньшими размерами и незначительным количеством, что характерно для электрошлакового металла. Вблизи зоны сплавления формируется пластинчато-игольчатая структура Видманштетта веерообразного характера.

*Вариант II.* Исходная сталь 45, как и в первом варианте, имеет феррито-перлитную зернистую структуру, но с преобладанием ферритной составляющей. По мере приближения к зоне сплавления элементы структуры укрупняются и носят смешанный характер: крупнозернистая феррито-перлитная структура чередуется с элементами литой пластинчато-блочной структуры с выраженной направленностью, характерной для электрошлаковой кристаллизации. Так формируется переходная зона, характерной особенностью которой является еще и отсутствие неметаллических включений, за исключением единичных сильно метаморфизованных частиц.

Зона сплавления четко выражена, выделяется крупноблочной структурой Видманштетта. Зерна-блоки феррита явно легированные хромом, о чем свидетельствуют более высокий рельеф, чем у обычного феррита, и более высокая твердость.

Неметаллические включения, как и в предыдущей

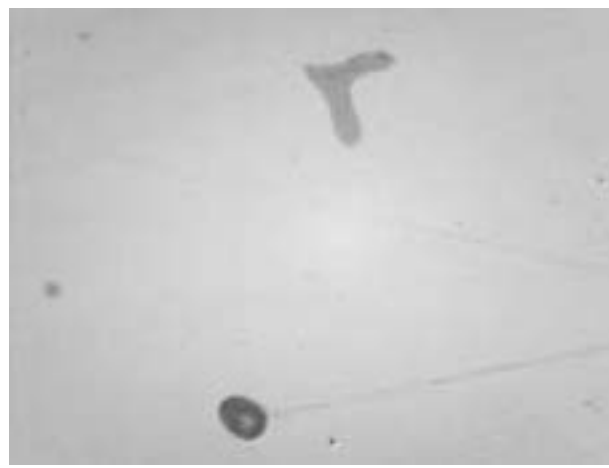


Рис. 2. Глобулярные включения сложного состава в зоне сплавления (сталь 45 на сталь 45), ×900

зоне, имеют глобулярную форму, аморфную или стекловидную микроструктуру и сложный химический состав. Размер большей части включений составляет 1-3 мкм, а некоторые достигают 10 мкм.

Переходная зона характеризуется постепенным переходом дисперсной троститного типа структуры к игольчатой мартенситной. Необходимо отметить, что формирование тростита, по всей видимости, происходит в результате химического смешивания твердых растворов стали марок 45 и 12X13, а также диффузионного перераспределения легирующих элементов. Далее наблюдается выравнивание химического состава с образованием бейнитно-мартенситной структуры стали 12X13. НВ представлены эвтектическими сульфидами и окисульфидами, а также оксидами округлой формы с гетерогенной микроструктурой. Размер включений составляет 1-10, реже – 15-20 мкм. В переходной зоне включения практически отсутствуют.

*Вариант III.* Основа стали 12X13, в отличие от варианта II, имеет структуру мартенсита с прослойками феррита, в составе которого присутствует большое количество неметаллических включений. Основная масса включений представлена крупными (до 50 мкм) эвтектическими сульфидами, окисульфидами и оксидами округлой или эллипсоидной формы с гетерогенной микроструктурой (рис. 3).

Переходная зона, подобно варианту II, приобретает более грубый характер, мартенситные иглы укрупняются, образуется структура крупноигчатого мартенсита. НВ практически отсутствуют, за исключением единичных, сильно метаморфизованных частиц.

Зона сплавления слабо выражена, не имеет четких очертаний, то есть характер перехода структуры от основного металла к наплавленному плавный, постепенный. Отличительной особенностью такой структуры является наличие в ее составе мелких (1-3 мкм) однородных глобулярных включений сложного химического состава.

Наплавленный металл по своему типу и морфологии структуры не отличается от основы. Заметным

отличием его является отсутствие большого количества НВ, а также их дисперсность и равномерность распределения в матрице.

*Вариант IV.* Структура исходного (основа) металла стали марки 12X13 мелкодисперсная бейнитного типа. Вблизи зоны сплавления элементы структуры приобретают более грубый характер с преобладанием игольчатых форм. Такая структура, в отличие от предыдущей, характеризуется повышенной (4417 вместо 4027 Мн/м<sup>2</sup>) микротвердостью, что явно связано с диффузией структурообразующих элементов хрома и углерода.

В зоне сплавления стали марок 12X13 и 45 сформировалась крупноигчатая феррито-мартенситная структура, микротвердость которой меньше микротвердости основного металла и больше, чем в переходной зоне, прилегающей к стали 45. Приведенные данные изменения микротвердости показывают, что зона сплавления имеет усредненный состав, отличающийся от основного и наплавленного металла. Здесь, как и в предыдущем варианте, образуется незначительное количество НВ глобулярной формы.

Переходная зона наплавленного металла стали 45 обогащена хромом и отличается образованием плотной соорибитоподобной структуры, а также отсутствием ферритной составляющей. По мере дальнейшего удаления от переходной зоны химический состав металла выравнивается и соответствует составу литой стали 45. Феррит присутствует в незначительном количестве и выделяется по границам литого зерна в виде тонких пластин.

## Выводы

Полученные данные показывают, что существенные превращения структуры и НВ наблюдаются в переходных зонах, где протекают диффузионные процессы, способствующие перекристаллизации твердого раствора. В этих зонах заметно изменяется морфология (форма, размер, количество и распределение) структурных составляющих, которые зависят не только от режима электрошлаковой наплавки, но и от химического состава сплавляемых марок сталей.

В зонах сплавления всех вариантов ЭШН образуется жидкий металл, химический состав которого отличается от исходного и наплавленного. Соответственно в таких зонах формируется иная структура и другая природа НВ. Во всех вариантах ЭШН, за исключением варианта III, образуется грубая неоднородная структура, что свидетельствует о химической и структурной неоднородности металла в зонах сплавления.

Наиболее однородная и достаточно плотная структура сформировалась при сплавлении однородных по химическому составу легированных сталей марки 12X13 (рис. 4), хотя сплавление простых углеродистых сталей (сталь 45 на сталь 45) при тех же режимах наплавки привело к образованию грубой неоднородной структуры (рис. 5).

Характерной особенностью для всех исследуемых зон сплавления является образование благоприятной

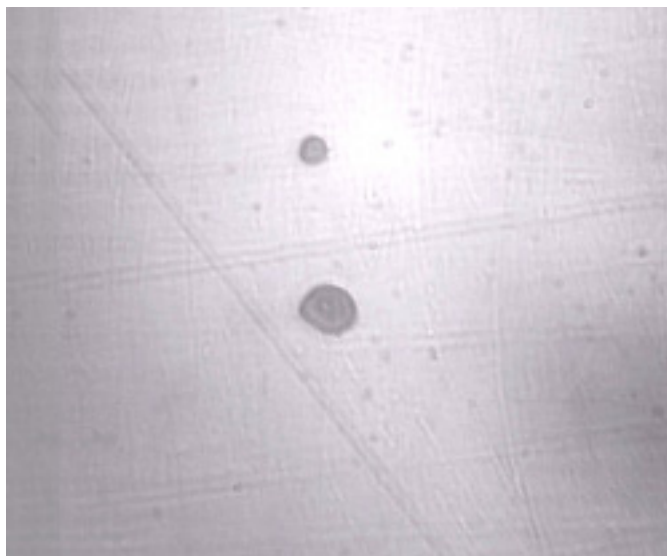


Рис. 3. Эвтектические сульфиды в стали марки 12X13,  $\times 900$



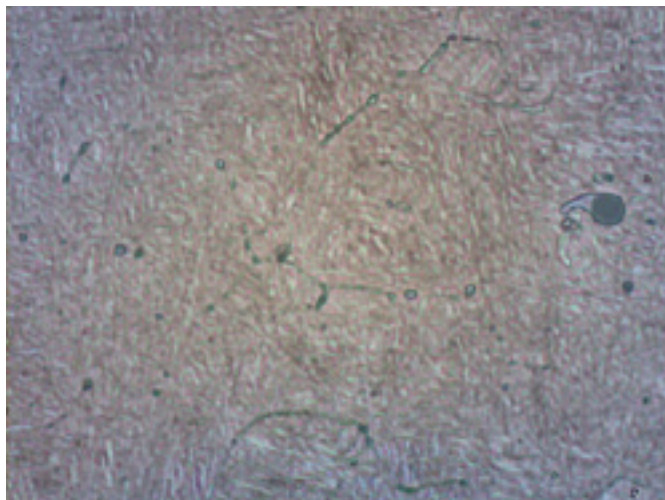


Рис. 4. Микроструктура зони сплавлення при наплавке стали марки 12X13 на сталь марки 12X13,  $\times 200$

природи НВ: глобулярна форма, однородна микроструктура, дисперсність (1-10 мкм) і незначительне кількість в структурі металу. Примічально, що в складі багатьох дисперсних (розміром 1-3 мкм) глобулей присутствують сера і такі елементи, як марганець, хром, рідко алюміній або кремній. Включення розміром близько 10 мкм мають більш складний склад (марганець, кальцій, алюміній, кислород або хром, кремній, алюміній) і не містять сери, що свідчить про ефективне видалення її в процесі ЕШН. Наявність позначених елементів в складі більш великих включень свідчить про протікання дифузійних процесів не тільки на межі сплавляємих сталей, але і на межі шлак-металл.

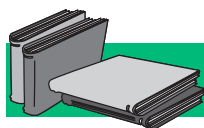
Таким чином, необхідно відзначити наступне: негативний вплив підвищених концентрацій



Рис. 5. Микроструктура зони сплавлення при наплавке стали 45 на сталь 45,  $\times 200$

сери на властивості наплавленого металу (зони сплавлення) легко видалюється електрошлаковим способом з використанням флюсу АНФ-6; сульфиди марганця і хрому, характерні для досліджуваних сталей марок 45 і 12X13, в зонах сплавлення відсутні повністю, а то незначительне кількість сери, зафіксоване мікрорентгеноспектральним аналізом, міститься в складі дисперсних включень глобулярної (благоприятної) форми; в структурі металу зон сплавлення всіх варіантів не виявлено негативної (пленочної) форми включень, а також тріщини, мікротріщини і пори.

Це сприяє очищенню металу в зонах сплавлення від шкідливих домішок, а також, що дуже важливо, переводу пліночних евтектичних сульфидів в благоприятну глобулярну форму.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Шульте, Ю. А. Неметаллические включения в электростали. – М.: Metallurgizdat, 1964. – 207 с.
2. Лунев, В. В., Аверин В. В. Сера и фосфор в стали. – М.: Metallurgiya, 1988. – 256 с.
3. Влияние электрошлакового переплава на качество и свойства колесной стали / Б. И. Медовар, М. И. Гасик, И. Г. Узлов и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. – 1986. – № 4. – С. 27-30.
4. Методика выявления зоны сплавления при электрошлаковой наплавке / Е. Н. Парахневич, Ю. П. Петруша, В. В. Лунев, В. П. Пирожкова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – № 5/1 (29). – С. 66-68.

### Анотація

Парахневич Є. М., Луньов В. В., Пирожкова В. П., Чеботарь Л. К., Бутова Н. М.  
Морфологія сульфідних вкраплень в металі електрошлакового наплавлення

Розглянуто процеси трансформації неметалевих вкраплень і структури в металі електрошлакового наплавлення з підвищеним вмістом сірки. Встановлено, що в зонах сплавлення формується інша форма неметалевих вкраплень та інша микроструктура.

### Ключові слова

електрошлакове наплавлення, неметалеві вкраплення, сірка, микроструктура, зона сплавлення

Transformation processes of non-metallic inclusions and structure in metal electroslag technology with the raised sulfur content are considered. It is established, that in fusion zones other form of non-metallic inclusions and other microstructure are formed.

УДК 621.745.558.669.295

Н. Н. Кузьменко, Л. Д. Кулак, Н. И. Левицкий\*, В. И. Мирошниченко\*

Институт проблем материаловедения НАН Украины, Киев

\*Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## Способы выплавки сплавов систем Ti-Si и Ti-Si-X

Приведены технические характеристики электронно-лучевой гарнисажной установки, универсального плазменно-дугового агрегата и экспериментальной вакуумно-дуговой печи, которые используют для выплавки серийных титановых сплавов. Проведенные опытные плавки показали, что выбор плавильного агрегата для получения качественных литых заготовок из сплавов систем Ti-Si и Ti-Si-X обусловлен массой, конфигурацией необходимых заготовок, наличием шихтовых материалов, стоимостью конечной продукции и т. п.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая установка, плазменно-дуговой агрегат, вакуумно-дуговая печь, сплавы систем Ti-Si и Ti-Si-X

В настоящее время возникла потребность в материалах, которые бы объединяли в себе малый удельный вес, значительные прочность и пластичность при комнатной температуре, жаропрочность и жаростойкость при температурах выше 600 °С. Существует также большой спрос на материалы с высоким модулем упругости. Одним из направлений решения данной проблемы есть создание титановых сплавов и композитов на основе системы Ti-Si с содержанием кремния, который превышает термодинамически стабильную величину в твердом растворе. Такие материалы имеют многофазную структуру, где упрочнение титановой матрицы тугоплавким соединением  $Ti_5Si_3$  происходит естественным путем в процессе кристаллизации. Сплавы данной системы являются перспективными для создания нового класса материалов с высоким уровнем физико-механических характеристик. В связи с этим решающее значение для обеспечения необходимого состава и однородности структуры, а также стабильности физико-механических свойств приобретает металлургическая стадия получения данных материалов в количестве, необходимом для проведения широкомасштабных исследований и практического применения.

Исходя из требований к выплавленному материалу и реальных возможностей, были испытаны три способа получения сплавов систем Ti-Si и Ti-Si-X

для выбора в дальнейшем оптимальных вариантов: электронно-лучевая, вакуумно-дуговая и плазменно-дуговая плавки. Технические характеристики электронно-лучевой литейной гарнисажной установки, универсального плазменно-дугового агрегата и рабочие параметры вакуумно-дуговой установки представлены в табл. 1-3.

При выборе конкретных составов, перспективных с точки зрения их практического использования, были взяты во внимание результаты исследований сплавов систем Ti-Si и Ti-Si-Zr в широком диапазоне концентраций кремния и циркония (0÷8,5 %мас. Si и

Таблица 1

Технические характеристики электронно-лучевой литейной установки на базе печи ИСВ-004

Наименование характеристики	Значение
Объем плавильной камеры, м <sup>3</sup>	2,2
Количество электронно-лучевых пушек, шт.	1
Максимальная мощность пушки, кВт	200
Рабочее давление в плавильной камере, Па	0,13
Давление в камере катода пушки, Па	0,0013
Затраты воды на охлаждение установки, м <sup>3</sup> /ч	10
Затраты воды на охлаждение тигля, м <sup>3</sup> /ч	2,4
Время достижения рабочего давления в камере после разгерметизации, ч	2