

АНАЛИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ЛИТОЙ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ ПУТЕМ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА И ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА

А. А. Полишко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.;

В. Я. Саенко, д-р техн. наук, ведущий науч. сотр.;

С. Н. Степанюк, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.;

И. Н. Клочков, канд. техн. наук, науч. сотр.

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев

Аннотация. Представлены результаты исследования неметаллических включений в соответствии со стандартами ASTM E45 и ГОСТ Р ИСО 4967–2009 в литом металле высоколегированной стали, который получен путем электрошлакового переплава расходоуемых электродов и электрошлакового переплава с применением жидкого металла. Проведен комплексный анализ неметаллических включений на разных этапах передела металла из исходного расходоуемого электрода до готового слитка по нескольким параметрам: химическому составу, морфологии и характеру распределения. Оценен уровень физико-механических свойств литого металла полученных слитков. Проведены фрактографические исследования и анализ неметаллических включений на поверхностях разрушения и изломов образцов после их испытаний на разрыв и удар.

Ключевые слова: неметаллические включения, расходоуемый электрод, жидкий металл, проба типа «чашечка», испытания на разрыв и удар, фрактографические исследования.

Анотація. Наведено результати дослідження неметалевих включень відповідно до стандартів ASTM E45 та ГОСТ Р ІСО 4967–2009 у литому металі високолегованої сталі, який отримано шляхом електрошлакового переплаву витратних електродів та електрошлакового переплаву із застосуванням рідкого металу. Проведено комплексний аналіз неметалевих включень на різних етапах переділу металу з вихідного витратного електрода до готового зливка за декількома параметрами: хімічним складом, морфологією та характером розподілу. Оцінено рівень фізико-механічних властивостей литого металу отриманих зливоків. Проведено фрактографічні дослідження та аналіз неметалевих включень на поверхнях руйнування та зламів зразків після їх випробовувань на розрив та удар.

Ключові слова: неметалеві включення, витратний електрод, рідкий метал, проба типу «чашечка», випробовування на розрив та удар, фрактографічні дослідження.

Abstract. The results of the study of non-metallic inclusions in the cast metal of high alloy steel produced during the electroslag remelting of consumable electrodes (ESR) and the liquid metal electroslag remelting (ESR LM) according to the standards of ASTM E45 and ГОСТ Р ISO 4967-2009 have been obtained. The comprehensive analysis of non-metallic inclusions on various stages of metal processing from the original consumable electrode to the finished ingot is conducted according to the several parameters, such as the chemical composition, distribution morphology and pattern. The level of physical and mechanical properties of the cast metal of obtained ingots is assessed. The fractographic study and analysis of non-metallic inclusions on the fracture surfaces of the samples after tensile and impact tests are conducted.

Keywords: non-metallic inclusions, consumable electrode, liquid metal, cup-like sample, tensile and impact tests, fractographic study.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Важным критерием оценки качества литого металла является степень загрязненности неметаллическими включениями, их химический состав и размер. Неметаллические включения в условиях высоких нагрузок при эксплуатации деталей ответственного назначения могут служить концентраторами напряжений и местами зарождения трещин, что является недопустимым. Многими исследователями показано, что в результате электрошлакового переплава (ЭШП) существенно уменьшаются количество и размеры неметаллических включений, а также имеет место более благоприятное их распределение в металле литой

электрошлаковой заготовки. В результате повышается однородность и стабилизируется средний уровень физико-механических и служебных свойств литого металла ЭШП [1–3].

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Современное состояние исследований в области ЭШП и электрошлакового переплава с применением жидкого металла (ЭШП ЖМ) детально описано в работе [4]. Многообразие фазового, химического составов, а также формы, размера и микроструктуры неметаллических включений, присутствующих

в стали, в значительной мере затрудняют их диагностику. Фазовый и химический состав, морфология и физико-химические свойства включений каждого типа требуют определенного комплекса методов анализа и, соответственно, разработки методик исследования, обеспечивающих всестороннее изучение неметаллических включений. Анализ неметаллических включений проводят многими методами. Одним из основных является металлографический, часто в сочетании с микрорентгеноспектральным методом анализа. В настоящей работе использовался комплексный анализ неметаллических включений, учитывая современные возможности методов сканирующей электронной микроскопии с применением международных стандартов и современных методик (ASTM, ISO, ГОСТ и др.).

ЦЕЛЮЮ РАБОТЫ является исследование качества литого металла высоколегированной стали, в частности изучение поведения неметаллических включений в литой электрошлаковой высоколегированной стали в процессе ее получения способами электрошлакового переплава расходуемых электродов и электрошлакового переплава с применением жидкого металла [4].

В задачи работы входили: комплексный анализ неметаллических включений на разных этапах передела металла от исходного расходуемого электрода до готового слитка по нескольким параметрам: химическому составу, геометрическим характеристикам и характеру распределения; оценка уровня физико-механических свойств литого металла слитков ЭШП и ЭШП ЖМ; фрактографические исследования и анализ неметаллических включений на поверхностях разрушения и изломов образцов после их испытаний на разрыв и удар.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

В качестве расходуемых электродов для ЭШП и получения жидкого металла для ЭШП ЖМ использовали высоколегированную сталь 03Ch17N14M3 (одной исходной плавки) согласно ГОСТ 5632–72 (% , вес.): ($\leq 0,07$) C; ($\leq 2,00$) Mn; ($\leq 1,00$) Si; (16,0...19,0) Cr; (10,0...14,0) Ni; (2,0...2,5) Mo. Выплавку слитков ЭШП и ЭШП ЖМ проводили по схеме вытяжки с применением токоподводящих водоохлаждаемых кристаллизаторов (ТПВК) диаметром 350 и 180 мм соответственно и шлака одного и того же химического состава (% , вес.): (34...40) CaF₂; (17...21) Al₂O₃; (11...22) CaO; (14...20) SiO₂; (7...11) MgO; (≤ 2) MnO.

В качестве расходуемого электрода при ЭШП использовали пакет прутков (6 шт.) из сортового проката квадрат 80 мм.

Для получения жидкого металла при ЭШП ЖМ в тигель-ковше ЭШП проводили переплав расходуемого электрода в виде пакета прутков (6 шт.) из сортового проката квадрат 80 мм с применением шлака марки АН-295 (ГОСТ 30756–2001) химиче-

ского состава (% , вес.): (11...17) CaF₂; (49...56) Al₂O₃; (26...31) CaO; (2,5) SiO₂; (≤ 6) MgO. Жидкий металл из тигель-ковша ЭШП в ТПВК заливали порциями с помощью металлических холодных ковшиков диаметром 75 мм путем периодического зачерпывания жидкого металла, покрытого слоем шлака, и подачи их сверху через шлаковую ванну в кристаллизатор таким образом, чтобы исключить возможность контакта жидкого металла с атмосферой. После выливания каждой порции жидкого металла из ковшика на внутренней его поверхности остается тонкий слой металлического гарнисажа, который образуется еще в тигель-ковше ЭШП в первый момент контакта холодного металлического ковшика с жидким металлом, покрытым толстым слоем шлака. Образовавшаяся на внутренней поверхности металлического ковшика металлическая «чашечка» (гарнисаж) легко отделяется (за счет термической усадки) от ковшика и была использована как технологическая проба для оценки степени загрязненности металла неметаллическими включениями на этапе получения жидкой стали в тигель-ковше ЭШП.

Неметаллические включения исследовали на следующих этапах получения готовых слитков ЭШП и ЭШП ЖМ (рис. 1).

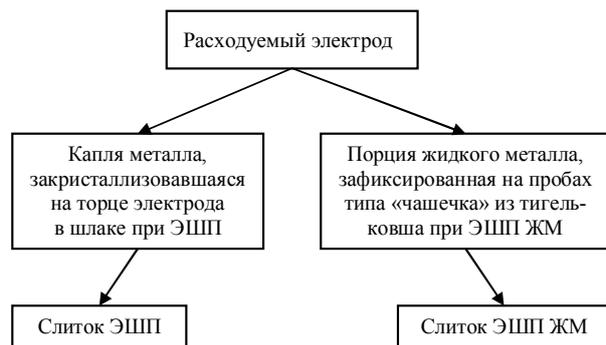


Рис. 1. Объекты исследований неметаллических включений при ЭШП и ЭШП ЖМ

Внешний вид расходуемого электрода, закристаллизовавшейся в шлаке капли жидкого металла на торце электрода ЭШП и зафиксированных проб жидкого металла типа «чашечка» представлены на рис. 2.

Исследования продольных макротемплетов, вырезанных из слитков ЭШП и ЭШП ЖМ диаметром 350 и 180 мм из высоколегированной стали 03Ch17N14M3 (рис. 3), свидетельствуют о высокой плотности и однородности литого электрошлакового металла, отсутствии каких-либо дефектов.

Для оценки неметаллических включений использовали международный стандарт ASTM E45 [5] и ГОСТ Р ИСО 4967–2009 [6]. Исследования проводили с применением электронной микроскопии, которая позволяет по изображениям нетравленной поверхности образцов проводить автоматическое разделение неметаллических включений по морфологическим типам и размерам.



Рис. 2. Внешний вид расходуемого электрода ЭШП (пакета сваренных прутков) (а), торец оплавленного электрода с закристаллизовавшейся каплей металла (б) и пробы жидкого металла типа «чашечка» при ЭШП ЖМ (в)

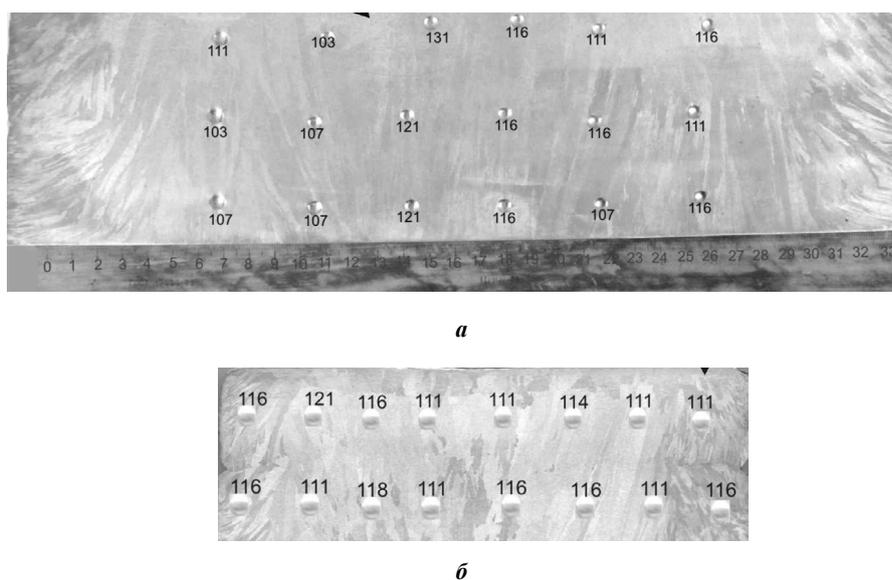


Рис. 3. Макроструктура и распределение твердости НВ на продольных темплатах слитка ЭШП диаметром 350 мм (а) и слитка ЭШП ЖМ диаметром 180 мм (б)

Процедура анализа заключается в следующем. Сначала производится выделение неметаллических включений по яркостным характеристикам в режиме ВЕІ (изображение в обратных электронах) при помощи аналитического комплекса, который состоит из сканирующего электронного микроскопа JSM-35CF фирмы «JEOL» (Япония) и рентгеновского спектрометра с дисперсией по энергии рентгеновских квантов (модель INCA Energy-350 фирмы «Oxford Instruments») (Великобритания). К тому же использовался режим SEI (изображение во вторичных электронах) для исследования морфологии и химического состава неметаллических включений, а также

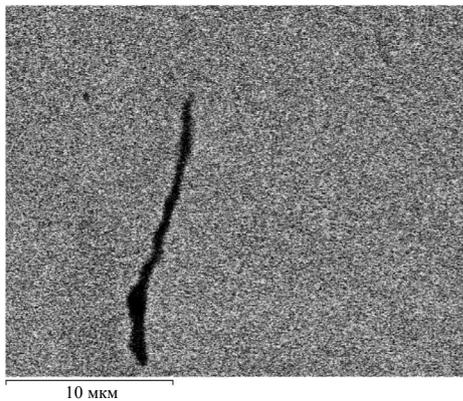
построения концентрационных карт распределения элементов. Эксперименты проводили при ускоряющем напряжении 20 кВ, увеличении от 200 до 10000, элементный анализ проводили в диапазоне от В до U. По морфологическим признакам и химическому составу на основе энергодисперсионного спектрального анализа производилось разделение включений на типы (элементный состав) и определялись их размеры. Обработку результатов анализа неметаллических включений проводили с помощью специальной программы количественного распределения фаз и включений (Feature). Все результаты представлены в весовых процентах.

Неметаллические включения исследовали в металле исходного расходного электрода, в металле закристаллизовавшейся в шлаке капли жидкого металла на торце электрода, в металле пробы жидкого металла типа «чашечка», литом металле слитка ЭШП и слитка ЭШП ЖМ из высоколегированной стали 03Сh17N14M3.

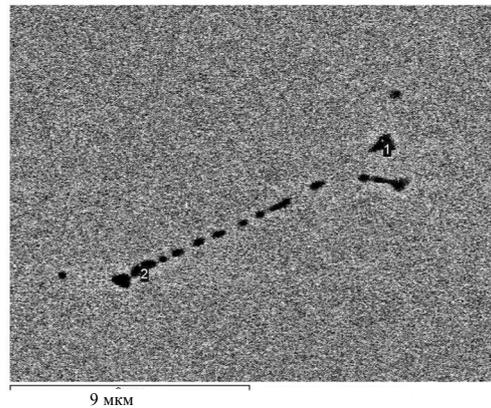
В соответствии со стандартами ASTM E45 и ГОСТ Р ИСО 4967–2009 определили следующие группы неметаллических включений: сульфиды марганца (тип А) (Mn–S), оксиды алюминия (тип В) (Al–O) и двухфазные включения типа D (Al–O–Mn–S). Серия включений – это параметр толщины включений. Рассчитали минимальную и максимальную ширину вклю-

чений, в случае глобулярных включений – диаметр. Определили тонкую и толстую серию. По полной длине включений вычислили балл для каждого типа включений, при этом использовали предельное значение длины.

В результате оценки металла исходного расходного электрода обнаружены вытянутые строчечные включения сульфида марганца (Mn–S) длиной до 20 мкм. Типичное сульфидное включение для электрода представлено на рис. 4,а. В зоне предплавления на расстоянии около 2 мм от торца поверхности электрода наблюдается их деление и сфероидизация, образование цепочек глобулей (см. рис. 4,б). Размер цепочек достигает 13 мкм, а размер включений в цепочках составляет от 0,24 до 7,00 мкм.



а



б

Спектр	Si	S	Cr	Mn	Ni
1	0,37	7,23	16,61	14,08	10,76
2	0,19	8,39	16,23	17,45	9,76

Рис. 4. Типичные включения сульфида марганца в металле расходного электрода (а) и зоне предплавления (б) (режим ВЕI, увеличение ×4000)

Высокая дисперсность включений в металле закристаллизовавшейся капли и проб типа «чашечка» позволила провести их автоматическое разделение в виде тройных диаграмм.

На торце расходного электрода в металле закристаллизовавшейся капли, после остановки процесса ЭШП, обнаружены включения сульфида марганца (Mn–S) правильной глобулярной формы и размером от 0,5 до 1,5 мкм. Выявлены двухфазные включения (Al–O–Mn–S) размером до 1 мкм, которые не были обнаружены в металле расходного электрода. Это свидетельствует о взаимодействии металла со шлаком уже на уровне плавления электрода. Результаты исследований представлены в виде тройной диаграммы и гистограммы количественного распределения включений по размеру (рис. 5).

В металле проб типа «чашечка» также преобладают включения сульфида марганца правильной глобулярной формы размером до 1,5 мкм, обнаружены включения оксида алюминия (Al–O) размером до

2 мкм. Выявлены единичные двухфазные включения (Al–O–Mn–S) размером до 2,3 мкм. Результаты исследований представлены в виде тройной диаграммы и гистограммы количественного распределения включений по размеру (рис. 6).

В литом металле слитка ЭШП обнаружены включения сульфида марганца размером до 5,4 мкм, включения оксида алюминия размером до 5,2 мкм и двухфазные включения (Al–O–Mn–S) размером до 7 мкм (рис. 7,а).

В литом металле слитка ЭШП ЖМ выявлены включения сульфида марганца среднего размера до 3 мкм, оксида алюминия и двухфазные включения (Al–O–Mn–S) размером до 2,9 мкм (см. рис. 7,б).

Морфология характерного двухфазного включения Al–O–Mn–S как для металла слитка ЭШП, так и для слитка ЭШП ЖМ представлена на рис. 8.

Полученные результаты исследований обобщены и представлены в табл. 1.

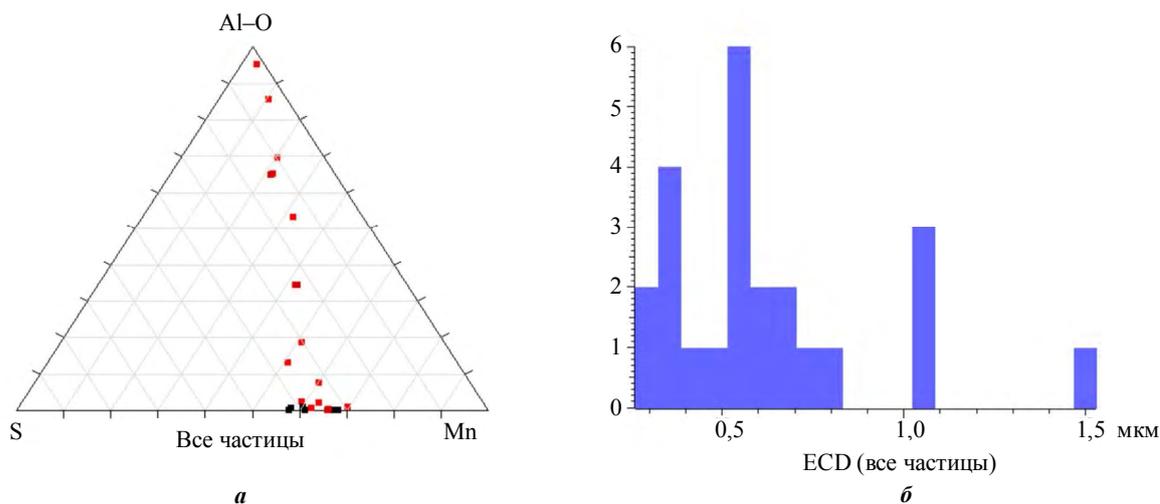


Рис. 5. Диаграмма относительного содержания включений (%) Al–O–Mn–S (а) и гистограмма количественного распределения их по размеру в металле капли (б)

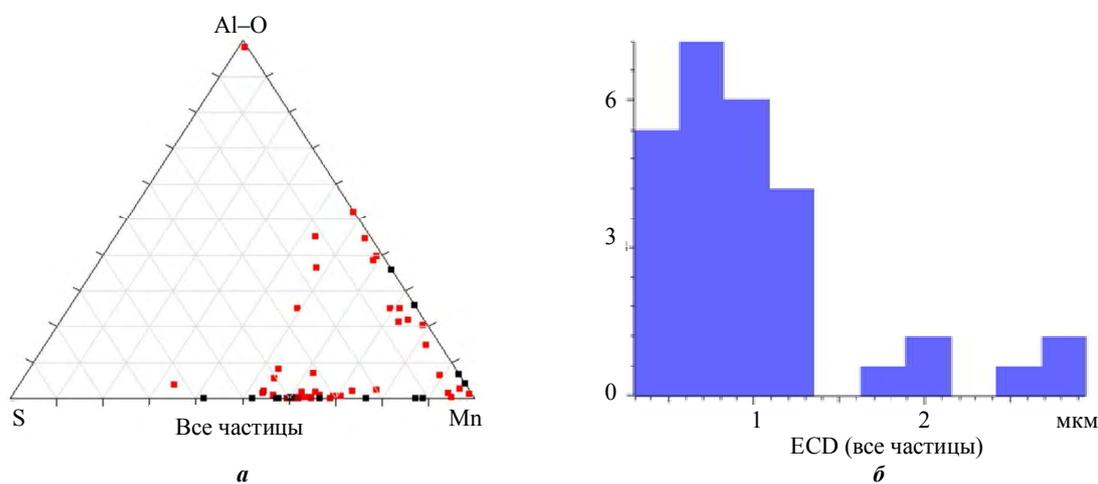
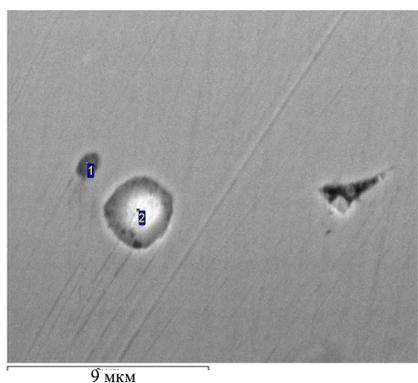
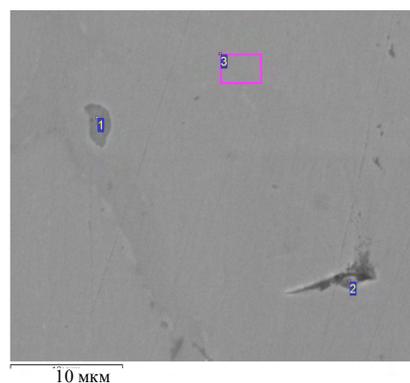


Рис. 6. Диаграмма относительного содержания включений (%) Al–O–Mn–S (а) и гистограмма количественного распределения их по размеру в металле «чашечки» (б)



Спектр	O	Al	Cr	Mo
1	47,29	39,29	2,75	2,17
2	50,73	47,11	0,86	0,00

а



Спектр	O	Al	Si	S	Cr	Mn	Ni
1	5,58	1,93	0,00	31,18	3,76	47,10	0,38
2	41,14	35,62	0,00	0,12	3,49	0,22	1,44
3	0,00	0,00	0,65	1,08	17,74	1,39	10,26

б

Рис. 7. Типичное включение оксида алюминия и сульфида марганца в металле ЭШП (а) и ЭШП ЖМ (б) (режим SEI, увеличение $\times 4000$)

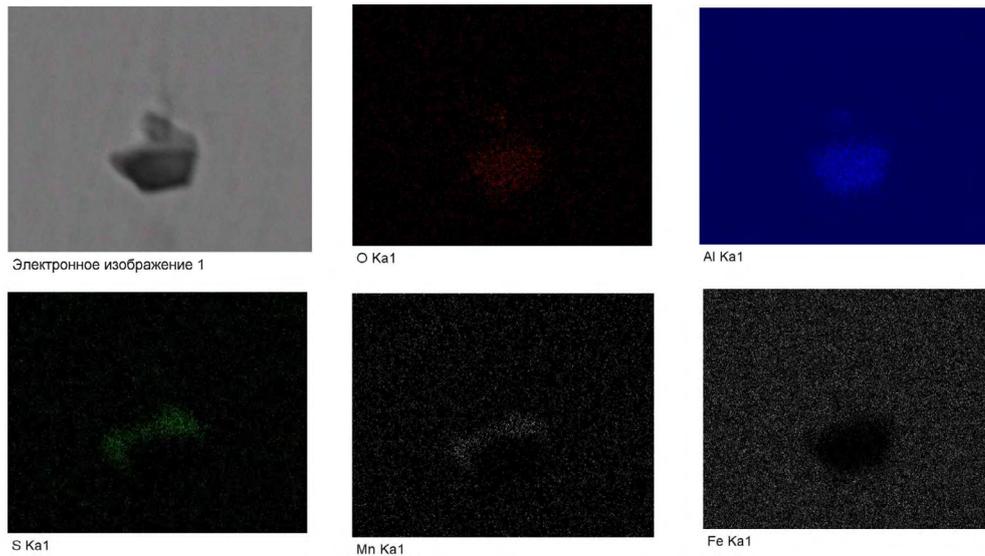


Рис. 8. Морфология типичного двухфазного включения Al–O–Mn–S (режим SEI, увеличение ×10000)

Таблица 1. Результаты анализа неметаллических включений согласно ASTM E45 и ГОСТ Р ИСО 4967–2009

Объект исследования		Тип	Серия	Балл	Количество, %	Средний размер	Средний размер включений
							мкм
Исходный катанный металл расходуемого электрода	Исходный металл	A	тонкие	< 0,5	100	15,19	9,43
	Зона предплавления	A	тонкие	< 0,5	100	3,67	
Закристаллизовавшаяся капля на торце электрода		A	тонкие	< 0,5	50	1,15	1,17
		D	тонкие	< 0,5	50	1,18	
Проба жидкого металла типа «чашечка» при ЭШП ЖМ		A	тонкие	< 0,5	51	1,55	1,81
		B	тонкие	< 0,5	2	1,92	
		D	тонкие	< 0,5	47	1,95	
Литой металл слитка ЭШП	Центр слитка	A	тонкие	< 0,5	42	2,89	4,65
		B	толстые	0,5	50	3,13	
		D	тонкие	< 0,5	8	6,47	
	Середина радиуса слитка	A	толстые	< 0,5	58	5,39	
		B	толстые	0,5	33	6,89	
		D	толстые	0,5	9	7,14	
Край слитка	A	тонкие	< 0,5	75	2,29		
	D	тонкие	< 0,5	25	2,96		
Литой металл слитка ЭШП ЖМ	Центр слитка	A	тонкие	0,5	59	3,55	2,77
		D	тонкие	0,5	41	3,31	
	Середина радиуса слитка	A	тонкие	< 0,5	29	3,77	
		D	тонкие	0,5	71	3,82	
	Край слитка	A	тонкие	< 0,5	45	2,36	
	Зона сплавления	D	тонкие	0,5	55	2,38	
	Зона сплавления в наплавленном слое	A	тонкие	< 0,5	47	2,95	
		D	тонкие	0,5	53	2,46	
	Середина наплавленного слоя	A	тонкие	< 0,5	52	2,56	
		B	тонкие	< 0,5	16	2,8	
		D	тонкие	< 0,5	32	2,46	
Край наплавленного слоя	A	тонкие	< 0,5	61	1,67		
	D	тонкие	0,5	39	1,88		

Примечание: включения типа A – Mn–S; типа B – Al–O и двухфазные включения типа D – Al–O–Mn–S.

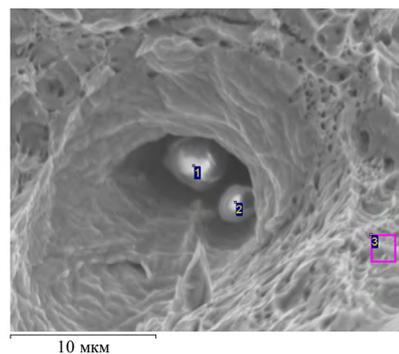
Установлено, что средний линейный размер включений в металле электрода составляет 9,43, в закристаллизовавшейся капле, за счет их деления, практически на порядок меньше – 1,2 мкм. В слитке ЭШП практически в четыре раза больше (4,7 мкм), чем в капле. В металле пробы «чашечка» средний размер неметаллических включений составляет 1,8 мкм, это также практически на порядок ниже, чем в металле исходного расходуемого электрода, но чуть крупнее, чем в металле капли. В металле слитка ЭШП ЖМ – 2,8 мкм, это крупнее, чем в металле пробы «чашечка», но почти в два раза меньше, чем в слитке ЭШП. Возможно, это связано с меньшим объемом металла, который одновременно кристаллизуется при ЭШП ЖМ по сравнению с ЭШП, т. е. за счет уменьшения объемов ванны жидкого металла можно управлять размерами включений.

Несмотря на то что все типы включений во всех объектах исследований имеют балл $\leq 0,5$, включения существенно отличаются по своему среднему размеру. Кроме того, включения в исходном металле расходуемого электрода – строчечного типа.

Механические испытания литого металла слитков ЭШП и ЭШП ЖМ проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 1497–84 и ГОСТ 9651–84 на статическое (кратковременное) растяжение. Испытания проводили на сервогидравлической испытательной машине MTS 318.25 (США), максимальное усилие 250 кН на кратковременное растяжение. Результаты обрабатывались при помощи программного обеспечения TestWorks4 фирмы «MTS». Точность полученных результатов $\pm 0,5 \%$, а по ГОСТ 1497–84 – до 1 %. Испытания на ударный изгиб проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 9454–78 на образцах с концентратором посередине одним ударом маятникового пневматического копра типа 2130-КМ-03 с номинальной потенциальной энергией маятника 300 Дж при температуре 20 °С.

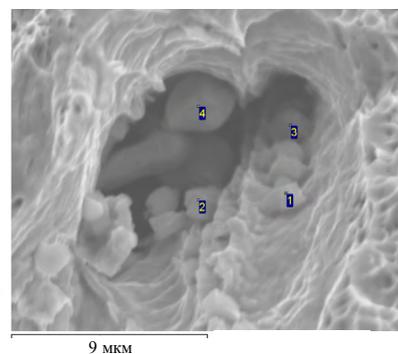
Установили, что уровень физико-механических свойств литого металла слитка ЭШП составляет: $\sigma_b = 433$ МПа, $\sigma_t = 194$ МПа, $\delta = 43 \%$, $\Psi = 56 \%$, $KCV^{+20} = 197$ Дж/см². Механические свойства литого металла слитка ЭШП ЖМ следующие: $\sigma_b = 474$ МПа, $\sigma_t = 191$ МПа, $\delta = 49 \%$, $\Psi = 52 \%$, $KCV^{+20} = 268$ Дж/см². По всем показателям уровень свойств литого металла ЭШП и ЭШП ЖМ находится в диапазоне требований, которые предъявляются к деформируемому металлу согласно «Metals Handbook 9th edition» (American Society for Metals) [7].

Фрактографический анализ поверхностей изломов образцов литого металла слитков ЭШП и ЭШП ЖМ после испытаний на статическое растяжение и ударный изгиб показал вязкий ямочный характер разрушения [8]. При этом на фрактограммах (рис. 9–12) обнаружены ямки различных размеров, в которых находятся неметаллические включения.



Спектр	O	Al	Si	S	Cr	Mn	Ni
1	6,81	6,54	0,64	22,88	3,68	6,81	4,20
2	51,75	42,21	0,09	1,63	0,00	51,75	0,45
3	0,76	0,09	0,35	21,92	1,41	0,76	5,96

а



Спектр	S	Cr	Mn	Ni
1	0,11	15,54	53,91	1,82
2	0,08	14,25	63,75	1,16
3	0,12	17,82	50,55	0,76
4	0,24	13,54	66,65	1,19

б

Рис. 9. Фрактограммы поверхностей разрушений образцов литого металла ЭШП после испытаний на статическое растяжение

После испытаний на статическое растяжение на фрактограммах поверхностей разрушений литого металла ЭШП и ЭШП ЖМ обнаружены достаточно мелкие включения сульфида марганца размером до 5 мкм и включения оксида алюминия от 2 до 7 мкм, которые имеют практически правильную глобулярную форму (см. рис. 9 и 10).

Следует отметить, что на поверхностях изломов наблюдается повышенное содержание включений по сравнению с результатами исследований неметаллических включений в литом металле после ЭШП и ЭШП ЖМ.

На фрактограммах поверхностей разрушений образцов литого металла слитка ЭШП после испытаний на ударный изгиб KCV (см. рис. 11) кроме включений сульфида марганца и оксида алюминия обнаружены включения Mn–Cr размером от 2 до 15 мкм, которые сконцентрированы в междендритном пространстве.

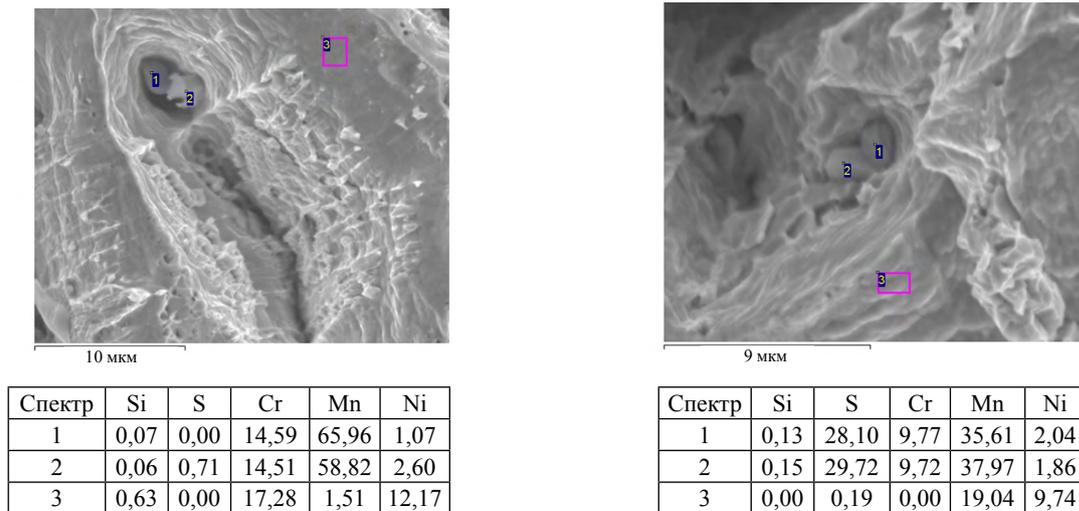


Рис. 10. Фрактограммы поверхностей разрушений образцов литого металла ЭШП ЖМ после испытаний на статическое растяжение

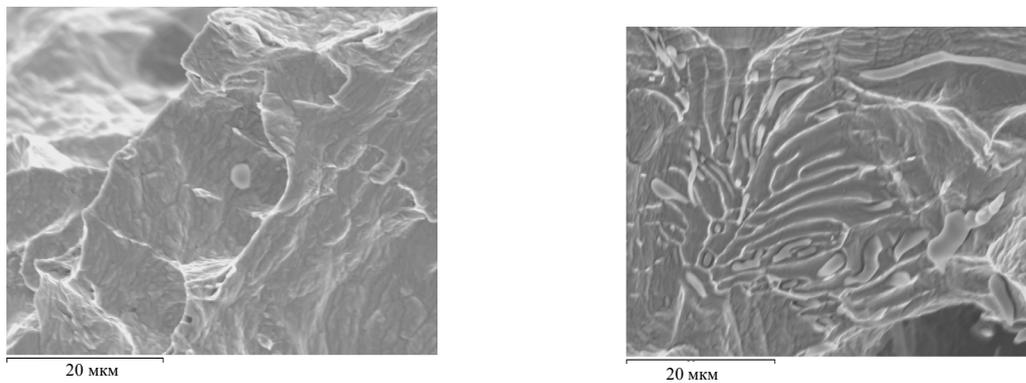


Рис. 11. Фрактограммы поверхностей разрушений образцов литого металла слитка ЭШП после испытаний на ударный изгиб

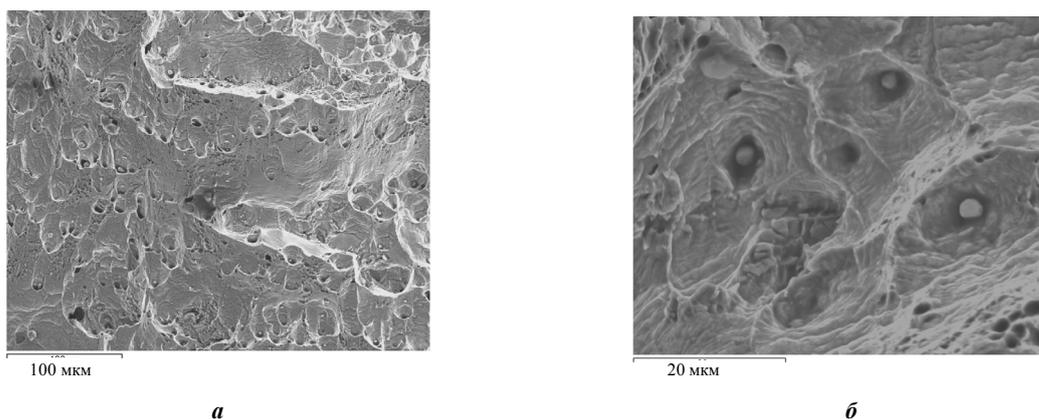


Рис. 12. Фрактограммы поверхностей разрушений образцов литого металла слитка ЭШП ЖМ после испытаний на ударный изгиб

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что в литом металле высоколегированной стали 03Ch17N14M3 после ЭШП и ЭШП ЖМ неметаллические включения идентичны по морфологическим типам. В основном они представлены

сульфидами марганца, оксидами алюминия. Выявлены включения сложных оксидов алюминия. Средний размер включений не превышает 4,7 и 2,8 мкм соответственно, что значительно меньше, чем в исходном металле электрода – 9,4 мкм.

2. Наличие включений оксида алюминия в капле металла на оплавленном торце расходоуемого электрода ЭШП, непосредственно контактировавшем со шлаком, свидетельствует о том, что уже на стадии плавления расходоуемого электрода ЭШП имеет место взаимодействие металла жидкой пленки, образующейся на его торце, с компонентами шлака (в данном случае Al_2O_3).

3. Результаты механических испытаний показали, что литой металл высоколегированной стали 03Ch17N14M3 после ЭШП и ЭШП ЖМ по всем показателям соответствует требованиям, которые предъявляются к деформированному металлу. Фрактографические исследования и анализ неметаллических включений на поверхностях изломов образцов после их испытаний на разрыв и удар свидетельствуют о вязком характере их разрушений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Патон, Б. Е. Электрошлаковый металл [Текст] / Б. Е. Патон ; под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. – К. : Наук. думка, 1981. – 680 с.
- [2] Патон, Б. Е. Качество электрошлакового металла [Текст] / Б. Е. Патон ; под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. – К. : Наук. думка, 1990. – 312 с.
- [3] Медовар, Б. И. Исследование процессов рафинирования при ЭШП электродов большого сечения [Текст] / Б. И. Медовар, Ю. Г. Емельяненко, В. А. Тихонов // Рафинирующие переплавы. – 1974. – С. 3–5.
- [4] Новый технологический процесс получения сверхкрупных стальных слитков способом ЭШН ЖМ [Текст] / Б. Е. Патон, Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко [и др.] // Современная электрометаллургия. – 2007. – № 1. – С. 3–7.
- [5] ASTM E45–05. Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel [Text]. – New York : American Society for Testing and Materials, 2005. – 48 p.
- [6] ГОСТ Р ИСО 4967–2009. Сталь. Определение содержания неметаллических включений. Металлографический метод с использованием эталонных шкал [Текст]. – Стандартинформ, 2010. – 32 с.
- [7] Metals [Text] : Handbook. Vol. 3. Properties and selection stainless steels, tool materials, and special purpose metals. – American Society for Metals, 1980. – 882 p.
- [8] Фрактография и атлас фрактограмм [Текст] : справ. изд. : [пер. с англ.] / под ред. Дж. Феллоуза. – М. : Металлургия, 1982. – 488 с.

© Колектив авторів

Надійшла до редколегії 12.09.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК

д-р техн. наук, проф. В. Ф. Квасницький

Статтю розміщено у Віснику НУК № 4, 2013