



The nature of non-metallic impurities of high-manganese wear-resistant steel is investigated by means of scanning electronic microscopy. The optimal compounds of complex additives (titan, vanadium, chromium, molybdenum, nitrogen), providing the highest operational characteristics of details, are determined.

А. И. ГАРОСТ, Белорусский государственный технологический университет

УДК 669.187.2:620.17

ПРИРОДА И ХАРАКТЕР НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ВЫСОКОМАРГАНЦОВИСТОЙ СТАЛИ

В отливках из аустенитной стали, не имеющей фазовых превращений, получение мелкозернистой структуры может быть достигнуто только путем регулирования процесса кристаллизации жидкого металла.

Известно, что температура заливки форм оказывает решающее влияние на размер зерен аустенита. С понижением температуры заливки можно получать более мелкозернистую сталь. Однако использовать температурный фактор для регулирования процесса кристаллизации можно частично, так как технологические условия заливки форм требуют определенной степени перегрева жидкой стали. Особенно большие трудности с получением мелкозернистой структуры возникают при производстве тонкостенного литья.

Одним из наиболее эффективных методов воздействия на характер первичной кристаллизации и процессы адсорбции, следовательно, и на трещиноустойчивость и механические свойства является модифицирование и микролегирование (титаном, ванадием, хромом, молибденом, азотом и др.).

В стали 110Г13Л классического состава обнаруживаются только однотипные преимущественно глобулярные включения [1], состав которых указывает на преимущественное присутствие нерастворившихся при закалке карбидов $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$, а также незначительной доли сложных силикатов $n\text{FeO} \times m\text{MnO} \times p\text{SiO}_2$. Введение азота в высокомарганцевистую сталь не приводит к обнаружению видимых нитридных неметаллических включений. Образуются сложные глобулярные включения сульфидов марганца и сульфидов железа, представляющие собой раствор сернистого марганца в сернистом железе [2]. В начале кристаллизации выделяется сульфид железа (температура плавления 1190 °С), который при охлаждении жидкой стали превращается в сульфид марганца (температура плавления 1610 °С) [3], поэтому такие образования, содержащие до 90% тугоплавких сульфидов марганца, присутствуют в форме гло-

булей. Раскисление алюминием высокомарганцевистой азотсодержащей стали не приводит к образованию нитридов. Образуются кристаллические включения корунда (Al_2O_3) .

Модифицирование титаном способствует измельчению структуры при первичной кристаллизации и образованию характерных включений в закаленном состоянии [4]. Включения неправильной формы размерами до 4 мкм являются карбидами титана и $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$ и сульфидами марганца. Кубические включения по составу близки к карбонитридам титана, что подтверждает выводы Ю.А. Шульте [5] об образовании в жидком расплаве кристаллической взвеси нитридов (карбонитридов) титана. Глобулярные включения, вероятно, состоят из многофазных образований, состоящих из сложных силикатов $n\text{FeO} \times m\text{MnO} \times p\text{SiO}_2$ и карбидов $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$. Эти глобулярные включения и включения неправильной формы в момент кристаллизации находятся в жидком состоянии.

Легирование ванадием приводит к образованию содержащих небольшое количество закиси железа и марганца преимущественно в виде строчек карбонитридов ванадия [2], округлых и одиночных продолговатых не содержащих азот включений карбидов ванадия (V_4C_3) и осажденных из жидкой стали на многочисленных кристалликах шпинелей глобулярных включений сульфидов марганца и железа, т. е. комплексных включений железомарганцевых силикатов и сульфидов. Введение азота в ванадийсодержащую (0,30% V) высокомарганцевистую сталь [2] показывает наличие в виде одиночных продолговатых включений (без включений закиси железа и марганца) карбонитридов ванадия с большей концентрацией нитридной составляющей (~ в 2 раза), осажденных из жидкой стали обособленных глобулярных (без присутствия шпинелей) включений сульфидов марганца и карбидов типа Mn_3C , строчных не содержащих азот включений карбидов ванадия и марганцевистого цементита, осажденных из жид-

кой стали включений на многочисленных кристалликах ортосиликата марганца ($2\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$) карбидов типа Mn_3C , и округлых с ответвлениями включений на марганцовистой шпинели ($\text{MnO} \cdot \text{FeO}$) карбидов типа $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$.

В легированной хромом высокомарганцовистой стали присутствуют [6] глобулярные включения ортосиликата марганца (тефроита $2\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$) с включениями карбидов титана и хрома. В момент кристаллизации стали эти включения находятся в жидком состоянии, причем присутствуют они в виде многофазных образований. Внутри таких образований обнаруживаются характерные бескремнистые оксидные выделения гипоферрита марганца MnFeO_2 с преимущественным содержанием закисы железа. Присутствуют также включения марганцевой шпинели, содержащие карбиды титана, а также очень мелкие (до 2 мкм) глобулярные выделения железомарганцевой шпинели с непостоянным составом по металлическим элементам, содержащие в небольшом количестве карбиды хрома. При одновременном легировании хромом и азотом высокомарганцовистой стали [6] образуются угловатые дезориентированные включения сульфидов марганца и железа, осажденных из жидкой стали на многочисленных кристалликах карбидов титана и хрома и

продолговатые включения той же природы. В этой же стали четко дифференцируются прямоугольные включения комплексных карбонитридов титана, хрома и алюминия с повышенным содержанием кислорода в центрах таких выделений и кристаллические включения корунда (Al_2O_3).

Проведенные исследования [2, 4, 6] указывают на улучшение свойств высокомарганцовистой стали при модифицировании-легировании Ti, V, Cr, Mo, N. Рациональное модифицирование высокомарганцовистой стали комплексными присадками титана, ванадия, хрома, молибдена для повышения надежности и долговечности отливок является исключительно перспективным [5] и позволит в еще большей степени улучшить структуру и износостойкость.

Механизм влияния таких комплексных добавок на фазовый состав, механические и служебные характеристики исследован недостаточно и требует уточнения. Для этого проведена серия плавов в индукционных печах ИСТ-016 и ИСТ-1 на Восточно-Казахстанском машиностроительном заводе (табл. 1). Для обеспечения идентичных условий кристаллизации образцы заливали в формы из жидкостекольных самотвердеющих смесей, температура заливки поддерживалась постоянной – 1430 ± 10 °С.

Таблица 1. Химический состав опытных плавов аустенитной высокомарганцовистой стали

Номер плавки	Содержание элементов, мас. %									
	C	Mn	Si	V	Ti	Cr	Mo	N	S	P
33	1,10	13,0	0,70	0,34	0,10	–	–	0,042	0,005	0,065
35	1,10	13,0	0,70	0,34	0,10	–	–	–	0,005	0,065
18	1,09	12,20	0,80	0,34	–	1,38	–	–	0,006	0,065
21	1,09	12,20	0,80	0,34	–	1,38	–	–	0,005	0,063
29	1,15	13,0	0,80	0,30	–	1,38	–	0,025	0,005	0,065
19	1,09	12,20	0,80	0,34	–	1,38	0,45	–	0,006	0,065
22	1,09	12,20	0,80	0,34	–	1,38	0,45	–	0,005	0,063

В литом состоянии высокомарганцовистая сталь, содержащая 0,10% титана и 0,34% ванадия (рис. 1, б), имеет аустенитную структуру с выделениями карбидов по границам и полю зерна. В результате закалки с 1150°C карбиды полностью не растворяются и структура стали состоит из аустенита с карбидными выделениями, группирующимися у границ зерна (рис. 1, в). Исследования методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе ISM-5610LV методом электронно-зондового EDX анализа на детекторе IED 2201 природы неметаллических включений (табл. 2, плавка 35) показывают наличие нерастворенных при закалке от 1150 °С преимущественно глобулярных включений карбидов $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$ (поз. 1, рис. 2, д), а также продолговатых комплексных включений (поз. 2, рис. 2, д) карбидов ванадия и титана.

Введение азота (0,042%) в высокомарганцовистую сталь, содержащую 0,10% титана и 0,34% ванадия (плавка 33), приводит к уменьшению

размеров аустенитного зерна в литой стали и увеличению количества карбонитридных выделений по границам и полю зерна (рис. 1, а), которые при закалке от 1150 °С в значительной степени растворяются (рис. 1, в). Для уточнения результатов металлографических исследований методом сканирующей электронной микроскопии изучали природу неметаллических включений азотсодержащей стали (рис. 2, а, б, в, г).

Обнаруживаются кристаллические включения нитридов титана (поз. 1, рис. 2, а) размерами до 3 мкм. Форма и размеры значительной части включений указывают на их экзогенное происхождение, так встречаются ошлакованные глиноземом оторванные от футеровки частицы магнетита (поз. 2, рис. 2, а). Внутри отдельных кристаллов карбидов титана (поз. 1, рис. 2, б) встречаются характерные выделения сложных железохромомарганцевых оксидов (поз. 2, рис. 2, б). Карбиды титана без таких выделений имеют треугольную форму (поз. 1, рис. 2, в). Карбонит-

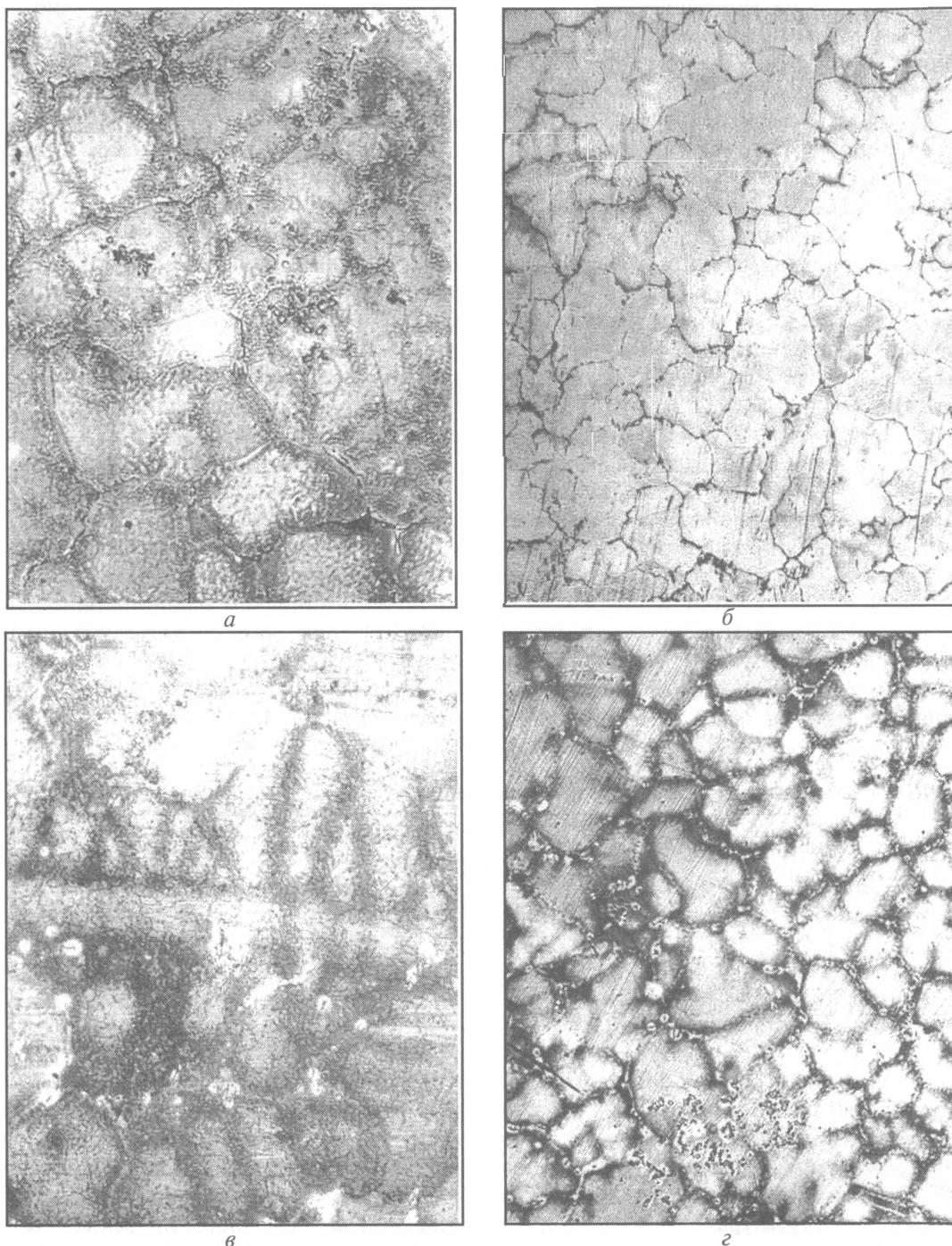


Рис. 1. Микроструктура стали 110Г13Л, содержащей 0,10% Ti и 0,34% V в литом (а, б) и закаленном (в, г) состояниях (металлографические исследования): а, в – введено 0,042% N (плавка 33); б, г – азот не вводился (плавка 35). а – $\times 250$; б – $\times 100$; в, г – $\times 320$

риды ванадия (поз. 1, рис. 2, г) с незначительным содержанием титана имеют компактную несколько вытянутую форму. В то же время титанованадиевые карбиды имеют вид строчечных выделений (поз. 2, рис. 2, г).

В литом состоянии высокомарганцовистая сталь с ванадием (0,34%) и хромом (1,38%) имеет мелкозернистую аустенитную структуру с карбидными выделениями по границам и полю зерна (рис. 3, б). В закаленной от 1190 °С стали крупные межзеренные карбиды растворяются (рис. 3, а) и

видно наличие большого количества мелкодисперсных неметаллических включений по границам и полю зерна, природу которых целесообразно исследовать методами сканирующей электронной микроскопии (рис. 3, г, д). Продувка аргоном такой стали обеспечивает получение более чистых межзеренных границ (рис. 3, в).

В высокомарганцовистой стали с ванадием (0,34%) и хромом (1,38%), не подвергавшейся продувке аргоном (плавка 18), присутствуют (рис. 3, г) сложной формы ванадийхромовые карбид-

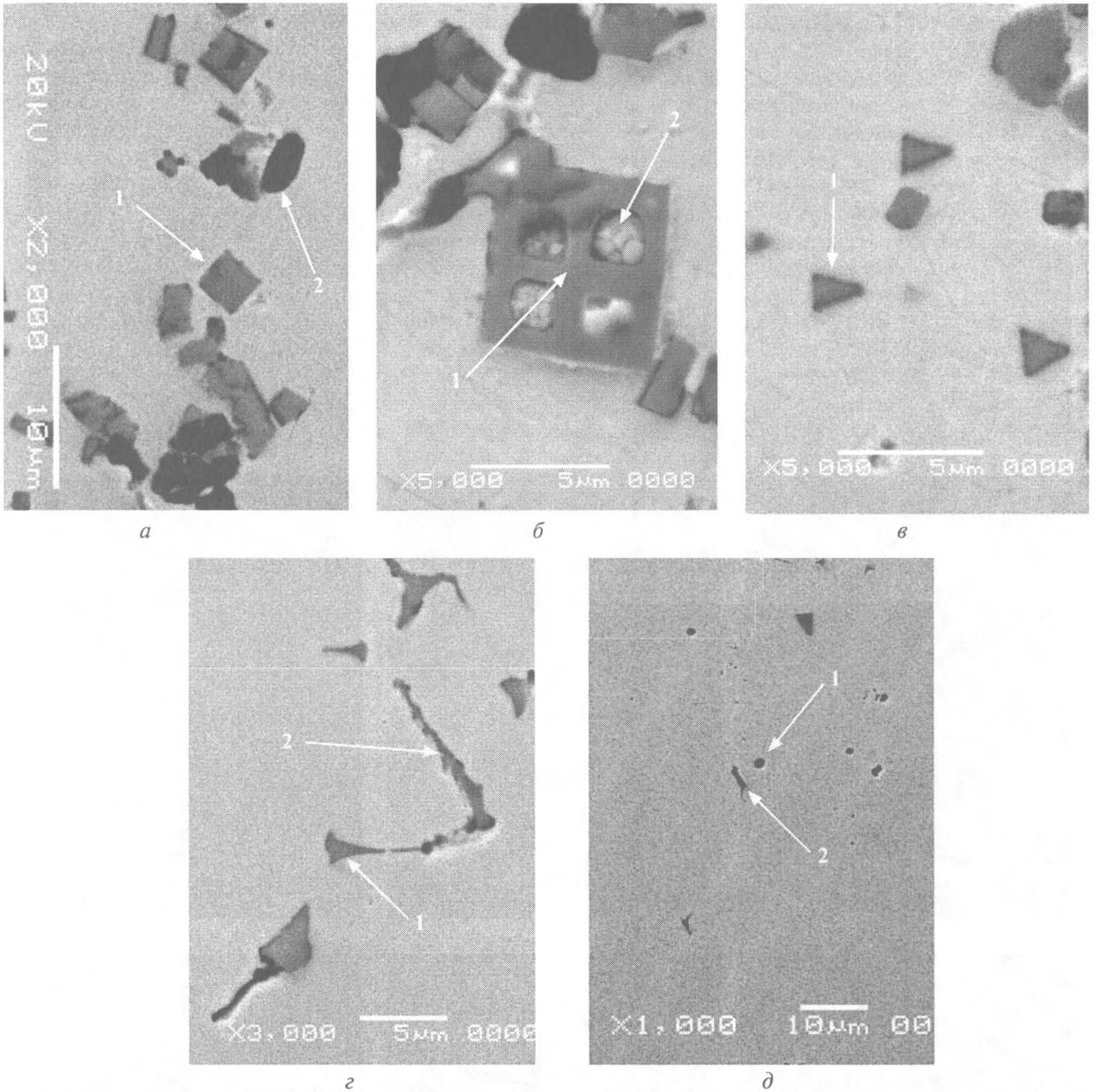


Рис. 2. Основные типы включений в закаленной высокомарганцевистой стали 110Г13Л, содержащей 0,10% Ti и 0,34% V (исследования методом сканирующей электронной микроскопии): а, б, в, г – введено 0,042% N (плавка 33); д – азот не вводился (плавка 35). а, г – x5000; б – x1000; в – x2000; д – 10 000

ные выделения (поз. 1, рис. 3, г) с невысоким содержанием хрома (3,95%), которые окружены (поз. 5, рис. 3, г) или в отдельных местах контактируют (поз. 4, рис. 3, г) с включениями не растворенного при закалке от 1190 °С марганцевого цементита $(Fe, Mn)_3C$, содержащего до 4,41% хрома. В этой же стали обнаруживаются мелкие (до 3 мкм) кристаллические выделения железомарганцевой шпинели (поз. 2, рис. 3, г), содержащие в небольшом количестве карбиды, а также ванадийтитановые карбонитриды (поз. 3, рис. 3, г). Продувка аргоном ванадийхромовой высокомарганцевистой стали (плавка 21) в значительной степени изменяет морфологию неметаллических включений. Более четко идентифицируются карбиды ванадия (поз. 1, рис. 3, д)

сложной формы, а также карбиды хрома (поз. 3, рис. 3, д), окруженные марганцевистым цементитом $(Fe, Mn)_3C$ (поз. 2, рис. 3, д), и значительные выделения не растворенного при закалке от 1190 °С хромомарганцевованадиевого цементита (поз. 4, рис. 3, д).

Легирование азотом (0,025%) высокомарганцевистой стали с ванадием (0,34%) и хромом (1,38%) (плавка 29) способствует образованию по границам (поз. 1, рис. 3, е, поз. 1, рис. 3, ж) и полю (поз. 2, рис. 3, е, поз. 2, рис. 3, ж) аустенитных зерен кристаллических, содержащих до 4% хрома, ванадийтитановых карбонитридов. Включения фосфидной эвтектики в виде сложных комплексов $Fe - Fe_nP_m - Mn_xP_y$ располагаются по границам зерен (рис. 3, е, з), однако они

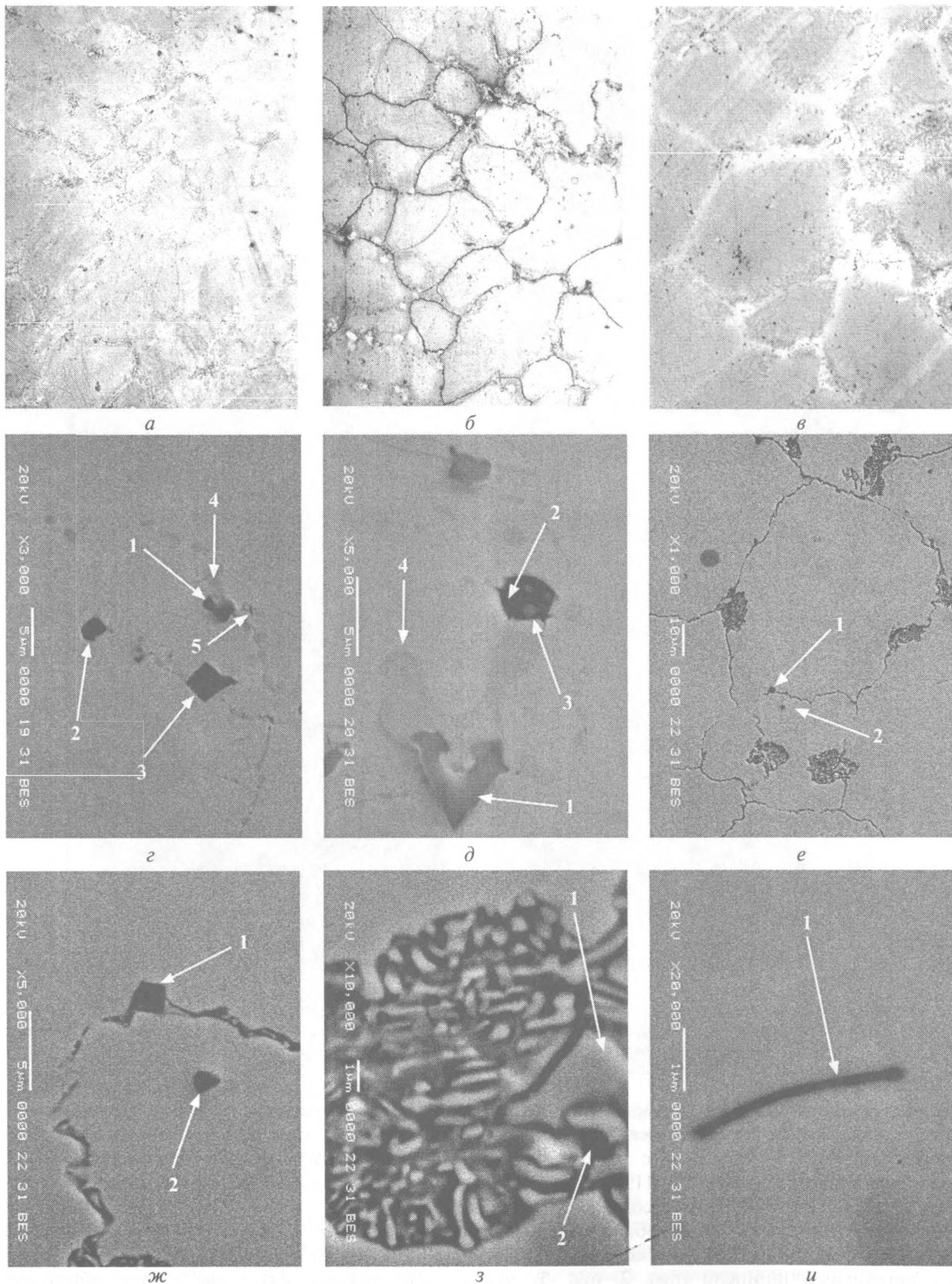


Рис. 3. Микроструктура стали 110Г13Л с 0,34% ванадия и 1,38% хрома в литом (б) и закаленном (а, в) состояниях; азот не вводился (а, б, в, г, д) (плавки 18, 21); введено 0,025% азота (е, ж, з, и) (плавка 29): а-в – металлографические исследования; г-и – исследования методом сканирующей электронной микроскопии; в, д – металл плавки 21 подвергнут дополнительной продувке аргоном. а – x200; б – x320; в – x400; г – x3000; д – x5000; е – x1000; ж – x5000

все же входят в состав хромомарганцовистого цементита $(Fe, Mn)_3C$ (поз. 1, рис. 3, з, поз. 2, рис. 3, з), что не подтверждает выводы [7] о том, что

видимые на шлифах фосфиды ошибочно классифицировались как карбиды. В данной стали идентифицируются также чрезвычайно мелкие (шири-

ной 0,2 мкм и длиной до 4 мкм) сложного состава пластинки (поз. 1, рис. 3, и) хромованадиевых (возможно и алюминийсодержащих) карбонитридов и железомарганцевой шпинели.

В литом состоянии высокомарганцовистая сталь с ванадием (0,34%), хромом (1,38%) и молибденом (0,45%) (плавка 19) имеет мелкозернистую аустенитную структуру с карбидными выделениями по границам и полю зерна (рис. 4, а). Исследования методом сканирующей электронной микроскопии природы неметаллических включений (табл. 2, плавка 19) показывают наличие в закаленном от 1190 °С состоянии преимущественно глобулярных (поз. 1, рис. 4, в) карбонитридов молибдена, содержащих марганец, при этом на отдельных подобных включениях четко различаются карбидная (поз. 1, рис. 4, г) и карбонитридная составляющие (поз. 2, рис. 4, г). В этом случае молибден практически полностью вытесняет хром и особенно ванадий из карбидов (карбонитридов). В то же время присутствуют

карбонитриды ванадия в виде включений неправильной формы (поз. 1, рис. 4, д), которые содержат около 13% молибдена и 5,7% хрома, из которых практически полностью вытеснен марганец. Продувка аргоном такой стали (плавка 22) в значительной степени изменяет морфологию неметаллических включений. Присутствуют многофазные образования, которые в процессе кристаллизации и охлаждения однородные в жидком состоянии, вследствие пересыщения отдельными элементами расстекловываются и представляют собой алюмомарганецсиликатные стекла (поз. 1, рис. 4, е) в молибденомарганцевых карбидах (поз. 2, рис. 4, е). Присутствуют, как и в плавке 19, карбонитриды ванадия в виде компактных включений неправильной формы (поз. 3, рис. 4, е), которые содержат около 4,25% молибдена и 5,38% хрома, из которых практически полностью вытеснены марганец и железо. Встречаются колонии (поз. 4, рис. 4, е) марганцовистого цементита ($Fe, Mn)_3C$, содержащего около 6% хрома.

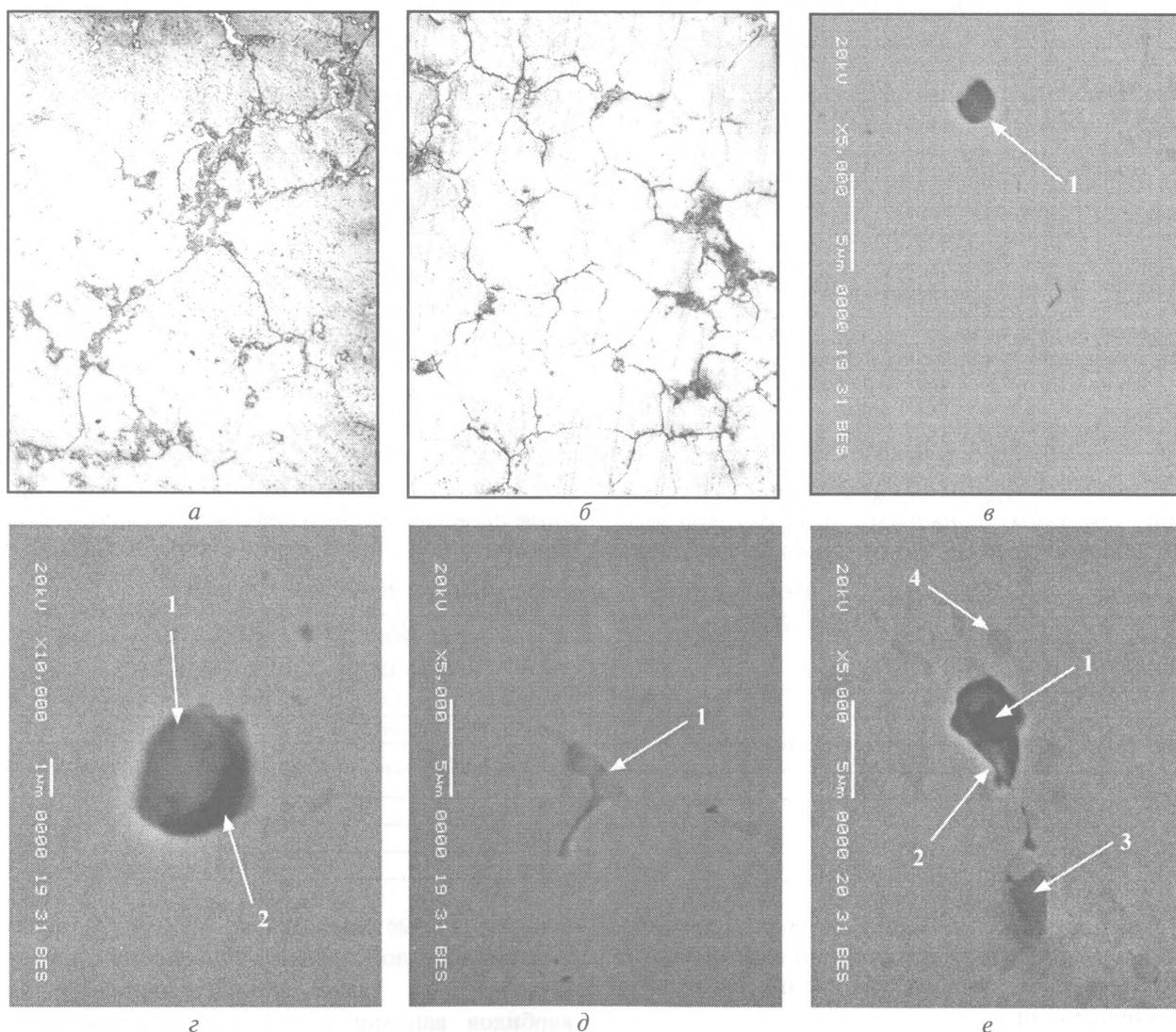


Рис. 4. Микроструктура стали 110Г13Л, легированной 0,34% ванадия, 1,38% хрома и 0,45% молибдена, выплавленной в индукционной (плавка 19) печи (а, в, г, д) и дополнительно рафинированной (плавка 22) аргоном (б, е), в литом (а, б) и закаленном (в, г, д, е) состояниях: а, б – металлографические исследования; в–е – исследования методом сканирующей электронной микроскопии. а, б – х200; в, д, е – х5000; г – х10 000

Таблица 2. Химический состав неметаллических включений опытных плавок аустенитной высокомарганцевистой стали

Номер плавки	Позиция включения	Содержание элементов, мас. %														
		C	O	Si	P	S	Al	Mn	Cr	V	Ti	Mo	Mg	Ca	N	Fe
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
33	1(рис. 2, а)	6,40	–	–	–	–	–	–	–	–	70,96	–	–	–	15,78	6,86
	2(рис. 2, а)	21,44	39,34				18,67	1,22			1,30		9,66			8,36
	1(рис. 2, б)	28,33	6,08				0,04	0,56			61,67		0,05			3,26
	2(рис. 2, б)	28,73	25,35					3,54	8,18		7,29					26,91
	1(рис. 2, в)	21,79						1,85	0,47		66,08					9,81
	1(рис. 2, з)	29,35						1,90	1,85	47,93	8,18				4,32	6,46
	2(рис. 2, з)	36,95						5,25	0,26	16,05	20,09					21,39
35	1(рис. 2, д)	11,34						13,15	1,18	0,92	0,28					73,13
	2(рис. 2, д)	27,23						5,69	0,50	21,33	20,62					24,63
18	1(рис. 3, з)	22,95	–	–	–	–	–	8,39	3,95	26,17	–	–	–	–	–	38,53
	2(рис. 3, з)	26,39	37,77	–	–	1,30	20,18	3,52	0,55	–	–	–	–	–	–	10,28
	3(рис. 3, з)	13,86	32,64	–	–	–	5,01	–	1,27	23,67	17,36	–	–	–	3,55	2,64
	4(рис. 3, з)	25,17	–	–	–	–	–	12,91	4,41	1,49	–	–	–	–	–	56,02
	5(рис. 3, з)	32,59	–	–	–	–	–	9,68	2,95	0,63	–	–	–	–	–	54,15
21	1(рис. 3, д)	22,83	–	0,37	–	–	–	5,22	2,77	41,95	–	–	–	–	–	26,85
	2(рис. 3, д)	32,59	–	–	–	–	–	9,68	2,95	0,63	–	–	–	–	–	54,15
	3(рис. 3, д)	21,42	–	0,19	–	–	–	8,01	33,25	1,01	–	–	–	–	–	36,12
	4(рис. 3, д)	24,09	–	–	–	–	–	20,96	7,60	2,14	–	–	–	–	–	45,21
29	1(рис. 3, е)	14,16	–	–	0,17	–	–	2,93	3,36	49,18	4,34	–	–	–	13,84	12,01
	1(рис. 3, ж)															
	2(рис. 3, е)	16,73	–	0,10	–	0,04	–	4,53	3,99	46,00	1,72	–	–	–	8,11	18,79
	2(рис. 3, ж)															
	1(рис. 3, з)	24,69	3,90	0,15	2,46	0,06	–	16,04	7,38	0,63	0,11	–	–	–	–	44,58
	2(рис. 3, з)	15,80	4,51	0,70	0,41	0,21	–	16,14	6,11	0,09	0,14	–	–	–	–	55,90
1(рис. 3, и)	17,00	8,51	–	–	–	5,64	9,42	1,43	0,41	–	–	–	–	1,52	56,08	
19	1(рис. 4, в)	29,35						26,54				31,37			2,30	10,43
	1(рис. 4, з)	11,71						27,85				40,36				20,09
	2(рис. 4, з)	22,91						16,69	2,18	0,42		17,64			3,26	36,90
	1(рис. 4, д)	26,98						3,03	5,70	36,16		13,53			7,30	7,29
22	1(рис. 4, в)	29,46	29,06	1,59			8,95	13,61	0,47	0,11		8,19	0,28	1,28		7,01
	2(рис. 4, в)	27,82	3,77	0,23			0,59	19,93	1,18	0,23		23,73	0,14	0,31		22,08
	3(рис. 4, в)	27,90		0,10				4,39	5,38	41,72		4,25	0,08	0,22	6,50	9,45
	4(рис. 4, в)	27,30		0,34			0,05	16,03	6,08	1,33		0,06		0,23		48,58

Комплексное модифицирование и легирование (титаном, ванадием, хромом, молибденом, азотом) способствуют повышению прочностных характеристик, при этом характеристики пластичности и ударной вязкости понижаются (табл. 3).

Таблица 3. Механические характеристики исследуемых сплавов

Номер плавки	Содержание добавок в стали, мас. %					Механические характеристики					
	V	Ti	Cr	Mo	N	σ_b , МПа	σ_s , МПа	KCU, МДж/м ²	δ , %	ψ , %	НВ, МПа
33	0,34	0,10			0,042	715	510	1,4	15,0	16,5	2210
35	0,34	0,10			–	685	495	1,5	12,4	13,5	2070
18	0,34	–	1,38	–	–	680	500	1,8	11,0	18,0	2170
21	0,34	–	1,38	–	–	785	515	1,3	20,0	27,0	2410
29	0,30	–	1,38	–	0,025	710	530	1,1	11,5	16,0	2210
19	0,34	–	1,38	0,45	–	715	535	1,2	12,5	18,0	2290
22	0,34	–	1,38	0,45	–	710	510	1,3	18,0	14,0	2170

Результаты исследований позволили разработать новые составы износостойкой высокомарганцевистой стали, которые защищены авторскими свидетельствами.

Выводы

В высокомарганцевистой стали, содержащей 0,10% титана и 0,34% ванадия, присутствуют

нерастворенные при закалке от 1150 °С преимущественно глобулярные включения карбидов (Fe,Mn)₃C, а также комплексные включения карбидов ванадия и титана вытянутой формы. Введение азота (0,042%) способствует образованию кристаллических включений нитридов титана, присутствуют также отдельные кристаллы

карбидов титана кубической формы, внутри которых встречаются характерные выделения сложных железохромомарганцевых оксидов. Карбиды титана без таких выделений имеют треугольную форму. Карбонитриды ванадия с незначительным содержанием титана имеют компактную несколько вытянутую форму. В то же время титанованадиевые карбиды присутствуют в виде строчечных выделений. Встречаются ошлакованные глиноземом оторванные от футеровки частицы магнезита.

В высокомарганцевистой стали с ванадием (0,34%) и хромом (1,38%), не подвергавшейся продувке аргоном, присутствуют сложной формы ванадийхромовые карбидные выделения с невысоким содержанием хрома (3,95%), которые окружены или в отдельных местах контактируют с включениями не растворенного при закалке от 1190 °С марганцевистого цементита $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$, содержащего до 4,41% хрома. В этой же стали обнаруживаются мелкие (до 3 мкм) кристаллические выделения железомарганцевой шпинели, содержащие в небольшом количестве карбиды, а также ванадийтитановые карбонитриды. Продувка аргоном ванадийхромовой высокомарганцевистой стали в значительной степени изменяет морфологию неметаллических включений. Более четко идентифицируются карбиды ванадия сложной формы, а также карбиды хрома, окруженные марганцевистым цементитом $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$, и значительные выделения не растворенного при закалке от 1190 °С хромомарганцевованадиевого цементита. Введение азота в данную сталь способствует образованию по границам и полю аустенитных зерен кристаллических, содержащих до 4% хрома, ванадийтитановых карбонитридов. Включения фосфидной эвтектики в виде сложных комплексов $\text{Fe} - \text{Fe}_n\text{P}_m - \text{Mn}_x\text{P}_y$ располагаются по границам зерен, однако они все же входят в состав хромомарганцевистого цементита $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$. Идентифицируются также чрезвычайно мелкие (шириной 0,2 мкм и длиной до 4 мкм) сложного состава пластинки хромованадиевых (возможно и алюминийсодержащих) карбонитридов и железомарганцевой шпинели.

В высокомарганцевистой стали с ванадием (0,34%), хромом (1,38%) и молибденом (0,45%) присутствуют преимущественно глобулярные кар-

бонитриды молибдена, содержащие марганец, при этом на отдельных подобных включениях четко различается карбидная и карбонитридная составляющая. В этих включениях молибден практически полностью вытесняет хром и особенно ванадий из карбидов (карбонитридов). В то же время имеются карбонитриды ванадия в виде выделений неправильной формы, которые содержат около 13% молибдена и 5,7% хрома, из которых практически полностью вытеснен марганец. Продувка аргоном изменяет морфологию неметаллических включений. Присутствуют многофазные образования, которые в процессе кристаллизации и охлаждения, однородные в жидком состоянии, вследствие пересыщения отдельными элементами расстекловываются и представляют собой алюмомарганецсиликатные стекла в молибденомарганцевых карбидах. Имеются карбонитриды ванадия в виде компактных включений неправильной формы, содержащие около 4,25% молибдена и 5,38% хрома, из которых практически полностью вытеснены марганец и железо. Встречаются колонии марганцевистого цементита $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$, содержащего около 6% хрома.

Проведенные исследования свидетельствуют о целесообразности легирования (модифицирования) аустенитной высокомарганцевистой стали комплексными добавками титана, ванадия, хрома, молибдена, азота для улучшения эксплуатационных характеристик деталей.

Литература

1. Гарост А.И. Влияние технологических факторов на структуру и свойства отливок высокомарганцевистой стали // Литье и металлургия. 2005. № 1. С. 126–131.
2. Гарост А.И. Неметаллические включения и формирование структуры модифицированной высокомарганцевистой стали // Литье и металлургия. 2006. № 1.
3. Born K. Arch Eisenhüttenwesen. 1958. N. 3. S. 179–187.
4. Гарост А.И. Влияние модифицирования на характер первичной кристаллизации и свойства отливок высокомарганцевистой стали // Литье и металлургия. 2005. № 3. С. 51–57.
5. Шульте Ю.А. Электрометаллургия стального литья. М.: Металлургия, 1970.
6. Гарост А.И. Влияние микросостава высокомарганцевистой аустенитной стали на механические и эксплуатационные характеристики отливок // Литье и металлургия. 2006. № 2. Ч. 2. С. 118–127.
7. Шерстюк А.А. Низкофосфористая высокомарганцевая сталь для отливок: Дис. ... ЗМИ, 1965.