

*The characteristics of economically-alloyed wear-resistant steels are investigated. The micro-composition and nature of nonmetallic impurities with decreased content of manganese are examined. The optimal alloys compositions for castings are offered.*

А. И. ГАРОСТ, Белорусский государственный технологический университет

УДК 669.187.2:620.17

## ВЛИЯНИЕ МАРГАНЦА НА МИКРОСОСТАВ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННЫХ МАРГАНЦОВИСТЫХ СТАЛЕЙ

### Введение

Сочетание высокой вязкости и способности к наклепу с высокой износостойкостью обеспечивает широкое применение отливок из высокомарганцовистой стали в машиностроении, горной, металлургической, химической, строительной промышленности и на транспорте. Сортамент изделий из этой стали исключительно многообразен: конусы и щеки дробилок, бронефутеровки мельниц, детали ковшей экскаваторов и землечерпалок, гусеничные траки, железнодорожные стрелки и крестовины и множество других деталей и приспособлений.

Исполнение отливок должно допускать их применение в районах с умеренным и холодным климатом для работы на открытом воздухе.

Тип и количество упрочняющей фазы в структуре марганцовистой стали обеспечивают соответствующее изменение не только износостойкости, но и ударной вязкости. Потеря запаса вязкости связывается также с видом напряженного состояния и охрупчивающим влиянием концентраторов напряжений, в том числе внутренних (в виде включений, микронесплошностей и т.п.). В результате роль структуры стали, ее фазового состава остается определяющей.

Необходимость изыскания резервов повышения износостойкости высокомарганцовистой стали, особенно при преобладании абразивного износа, приводит к применению не только сталей аустенитной структуры, но и аустенито-карбидных, аустенито-мартенситных структур с  $\epsilon$ - и  $\alpha$ -фазами. Тип и количество вторых фаз в объеме могут обеспечить соответствующее повышение износостойкости стали, но и изменить при этом сопротивление стали ударному воздействию, механизм разрушения.

В зависимости от назначения и требований, предъявляемых к литым деталям, отливки разделяют на группы [1]:

1) особо ответственного назначения — брони конусов и чаш дробилок крупного дробления, зубья ковшей экскаваторов;

2) ответственного назначения — подвижные и неподвижные брони щековых и конусных дробилок

среднего и мелкого дробления, била молотковых дробилок, траки, детали мельниц самоизмельчения, шаровых и стержневых мельниц диаметром свыше 3200 мм и диаметром мелющих тел свыше 100 мм;

3) общего назначения — детали шаровых и стержневых мельниц диаметром до 3200 мм и диаметром мелющих тел до 100 мм.

Для каждой из групп с учетом новых разработок (а.с. 850725, 1002394, 1110206, 1289906, 1315512, 1470804, 1515758) предлагается оптимальное содержание марганца и других элементов [1]: отливки 1-й группы рекомендуется изготавливать из стали 110Г13Л, 2-й группы — из стали 110Г10Л, 3-й группы — из стали 110Г8Л. В составе сталей допускается присутствие других легирующих элементов: титана — 0,05–0,15%, ванадия — 0,01–0,15, кальция 0,005–0,02, церия 0,02–0,05, иттрия 0,05–0,10, молибдена 0,40–0,60, алюминия 0,005–0,05, азота 0,005–0,02%.

Характеристики стали во многом зависят от микросостава сплава, связанного с особенностями его производства, условиями выплавки, раскисления, модифицирования и микролегирования [2–7].

Природа неметаллических включений в аустенитной высокомарганцовистой стали с пониженным марганцем изучена недостаточно.

### Износостойкая сталь с пониженным содержанием марганца

В стали 110Г13Л классического состава обнаруживаются в основном однотипные глобулярные включения. Состав включений [3] указывает на преимущественное присутствие нерастворившихся при закалке карбидов  $(Fe, Mn)_3C$  и незначительной доли включений сложных силикатов железа  $nFeO \cdot mMnO \cdot pSiO_2$ .

Для изучения характеристик износостойкой аустенитной стали с пониженным содержанием марганца проведена серия плавов (плавки 57, 58, 59) 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 —  $1430 \pm 10^\circ C$ .

Таблица 1. Химический состав опытных плавок аустенитной высокомарганцевистой стали

Номер плавки	Содержание элементов, мас. %						
	C	Mn	Si	Ti	N	S	P
57	0,78	8,70	0,44	—	—	0,005	0,078
58	0,74	8,70	0,58	—	0,052	0,005	0,078
59	0,69	8,80	0,57	—	0,051	0,006	0,078
43	1,05	6,90	0,45	0,10	0,026	0,028	0,040
44	1,03	7,92	0,80	0,10	0,025	0,022	0,044
48	1,03	9,03	0,66	0,10	—	0,016	0,040
49	0,98	9,87	0,64	0,07	0,030	0,016	0,041

В литом состоянии износостойкая сталь (плавка 57), содержащая 8,7% марганца (рис. 1, а), имеет

аустенитную структуру с выделениями карбидов по границам и полю зерна. Исследования методом

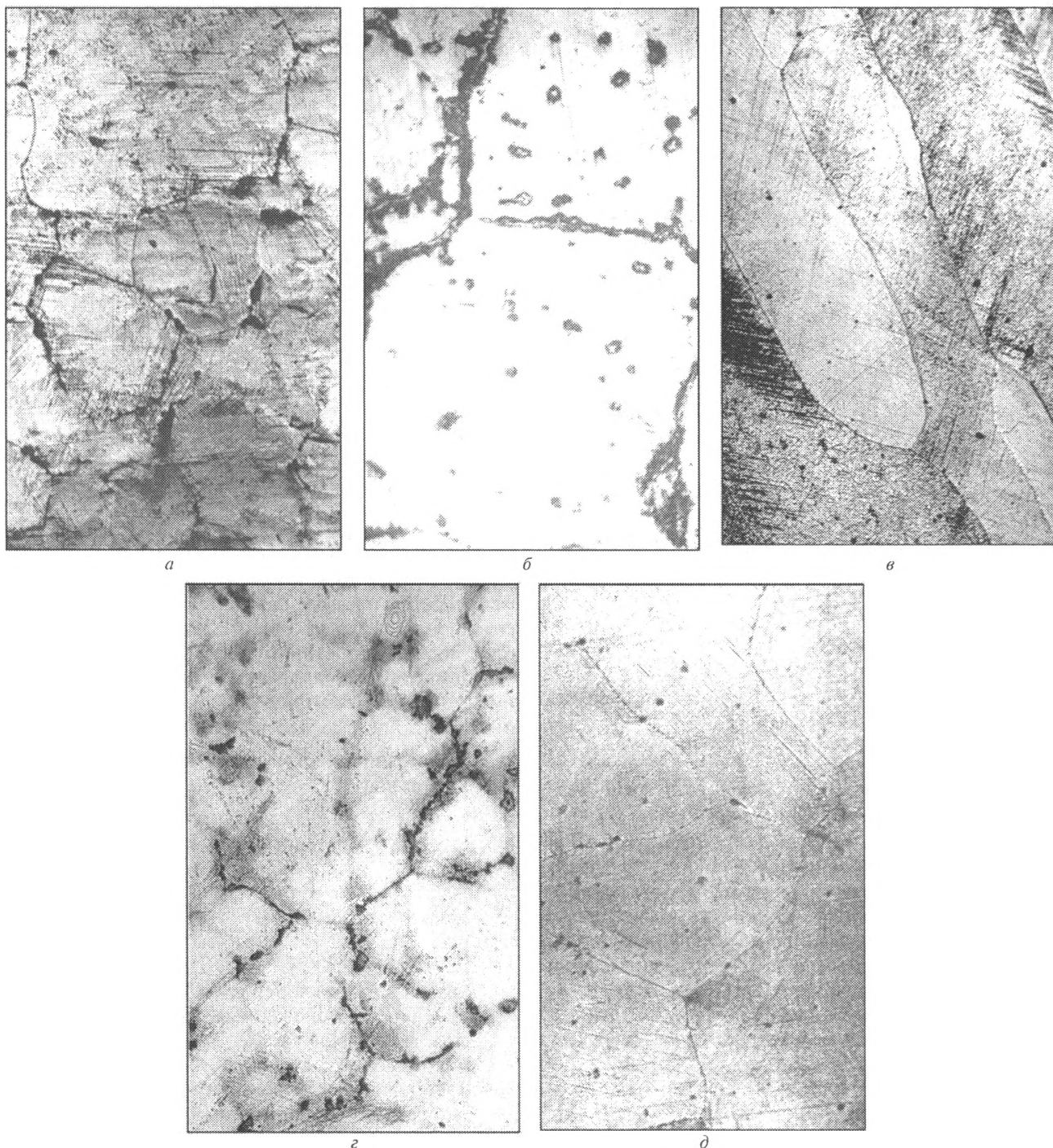


Рис. 1. Микроструктура (металлографические исследования) износостойкой аустенитной стали с пониженным содержанием марганца в литом (а, б, г) и закаленном (в, д) состояниях: а – плавка 57; б, в – плавка 58; г, д – плавка 59. а – х100; б, д – х320; в, г – х200

сканирующей электронной микроскопии на микроскопе ISM-5610LV методом электронно-зондового EDX анализа на детекторе IED 2201 природы неметаллических включений (табл. 2) показывают, что в закаленном от 1050°C состоянии (рис. 2, а) присутствуют компактные комплексные включе-

ния сульфидов и карбидов марганца (поз. 1, рис. 2, б и поз. 1, рис. 2, в), выделения (поз. 2, рис. 2, б) железомарганцевых оксидов (содержащие карбиды (Fe,Mn)<sub>3</sub>C), а также округлые включения (поз. 3, рис. 2, в) марганцовистого цементита (Fe,Mn)<sub>3</sub>C внутри сульфидов марганца (поз. 2, рис. 2, в).

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

Номер плавки	Позиция включения	Содержание элементов, мас.%													
		C	O	Si	P	S	Al	Mn	Cr	V	Ti	Mg	Ca	N	Fe
57	1(рис.2,б)	39,18	0,55	—	0,18	20,00	—	40,00			0,07	—	—	—	0,03
	2(рис.2,б)	16,21	18,11	0,59		0,47	—	5,97			—	—	0,66		57,99
	1(рис.2,в)	24,56	0,72	0,14		22,58	—	43,14			—				8,87
	2(рис.2,в)	27,41	1,66	—	—	23,59	—	46,48	—	—	—	—	—	—	0,86
	3(рис.2,в)	14,71	0,55	0,40	—	3,56	—	13,07	—	—	—	—	0,04	—	67,66
58	1(рис.2,д)	23,65	24,52	0,71		2,36	9,71	22,16	—	—	0,46	—	—	16,43	6,46
	2(рис.2,д)	26,49	17,19	0,56	—	0,04	—	4,39	4,47	—	—	—	0,33	—	46,52
	3(рис.2,д)	9,19	—	0,69	—	—	—	7,80	—	—	—	—	—	—	82,32
	4(рис.2,д)	7,50	0,39	0,39	—	—	—	11,44	—	—	0,06	—	—	0,39	79,52
	1(рис.2,е)	6,99	—	0,66	—	3,22	1,15	15,79	—	—	0,03	—	—	—	72,17
	2(рис.2,е)	21,03	13,89	1,12	—	12,42	5,34	37,92	—	—	0,09	—	—	—	8,19
	3(рис.2,е)	10,60	3,06	0,10	—	22,86	0,43	52,61	—	—	0,01	—	—	—	10,33
	4(рис.2,е)	25,18	1,14	22,54	—	0,03	0,15	6,27	—	—	0,20	—	—	—	44,49
59	1(рис.2,з)	15,34	—	—	—	—	—	6,12	1,99	3,24	36,63	—	—	14,68	22,00
	2(рис.2,з)	23,13	—	—	—	—	—	10,01	0,42	—	0,01	—	—	—	66,44
	3(рис.2,з)	17,93	0,34	0,34	—	11,45	0,14	22,91	—	—	—	—	—	—	46,89
	4(рис.2,з)	13,41	19,39	0,36	—	0,12	17,68	6,54	—	—	—	—	—	—	42,50
	5(рис.2,з)	23,38	—	14,93	—	—	—	5,93	0,04	0,04	—	—	—	—	55,67
43	1(рис.4,б)	0,90		0,10				2,34		1,58	69,70			13,77	11,61
	2(рис.4,б)	21,14		0,04		17,97		39,30							21,54
	3(рис.4,б)			0,04				0,71			82,85			11,96	4,44
	4(рис.4,б)	9,24		0,52		0,18		6,44							83,62
	5(рис.4,б)	8,82		0,46		0,02		6,80							83,90
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17
44	1(рис.4,г)	16,49				26,72		51,70							5,09
	2(рис.4,г)	15,77				26,60		53,44			0,09				4,10
	3(рис.4,г)			0,04				0,14			83,18			12,00	4,64
	4(рис.4,г)	6,19		0,03				6,91							86,87
48	1(рис.4,е)	0,32				0,10		0,51			81,51			13,82	3,74
	2(рис.4,е)	13,81				0,65		6,63						0,79	78,12
	3(рис.4,е)	15,91	42,96			0,43	14,12	1,27			17,50	5,63			2,17
	4(рис.4,е)	12,33		0,44		18,74		40,90							27,59
49	1(рис.4,з)			0,01		0,24		0,93			77,18			14,13	7,51
	2(рис.4,з)	11,16	0,30	0,21		24,95	0,21	49,71			0,38	0,28			12,79
	3(рис.4,з)			0,06		0,20		0,41			79,47	0,26		14,75	4,85
	4(рис.4,з)			0,28			0,26	3,04			51,05			14,64	30,73
	5(рис.4,з)	9,72	0,90	0,22		21,20		43,52				0,27			24,16
	6(рис.4,з)	9,02		0,40				0,32							83,70

В азотсодержащей (0,052% N) высокомарганцовистой стали (плавка 58), содержащей 8,7% марганца, присутствуют карбидные выделения по границам и полю зерна в литом (рис. 1, б) и закаленном (рис. 1, в) состояниях. Размеры таких неметаллических включений (рис. 2, в) несколько выше, чем в стали без азота (рис. 2, а). В азотсодержащей стали (плавка 58) присутствуют мелкие (до 2 мкм) округлые выделения (поз. 1, рис. 2, д) железомарганцевых оксидов, содержащих нитриды (карбонитриды) алюминия, комплексные грубые

железохроммарганцевые карбидоксидные выделения (поз. 2, рис. 2, д), включения марганцовистого цементита (поз. 3, рис. 2, д и поз. 1, рис. 2, е) и такие же выделения с незначительным содержанием карбонитридов титана (поз. 4, рис. 2, д), неоднородного состава включения оксисульфидов марганца с частицами железной шпинели (поз. 2, рис. 2, е) на фоне марганцовистого цементита (Fe,Mn)<sub>3</sub>C, содержащего сульфиды марганца (поз. 3, рис. 2, е) и кремнийсодержащий марганцовистый цементит (Fe,Mn)<sub>3</sub>C (поз. 4, рис. 2, е).

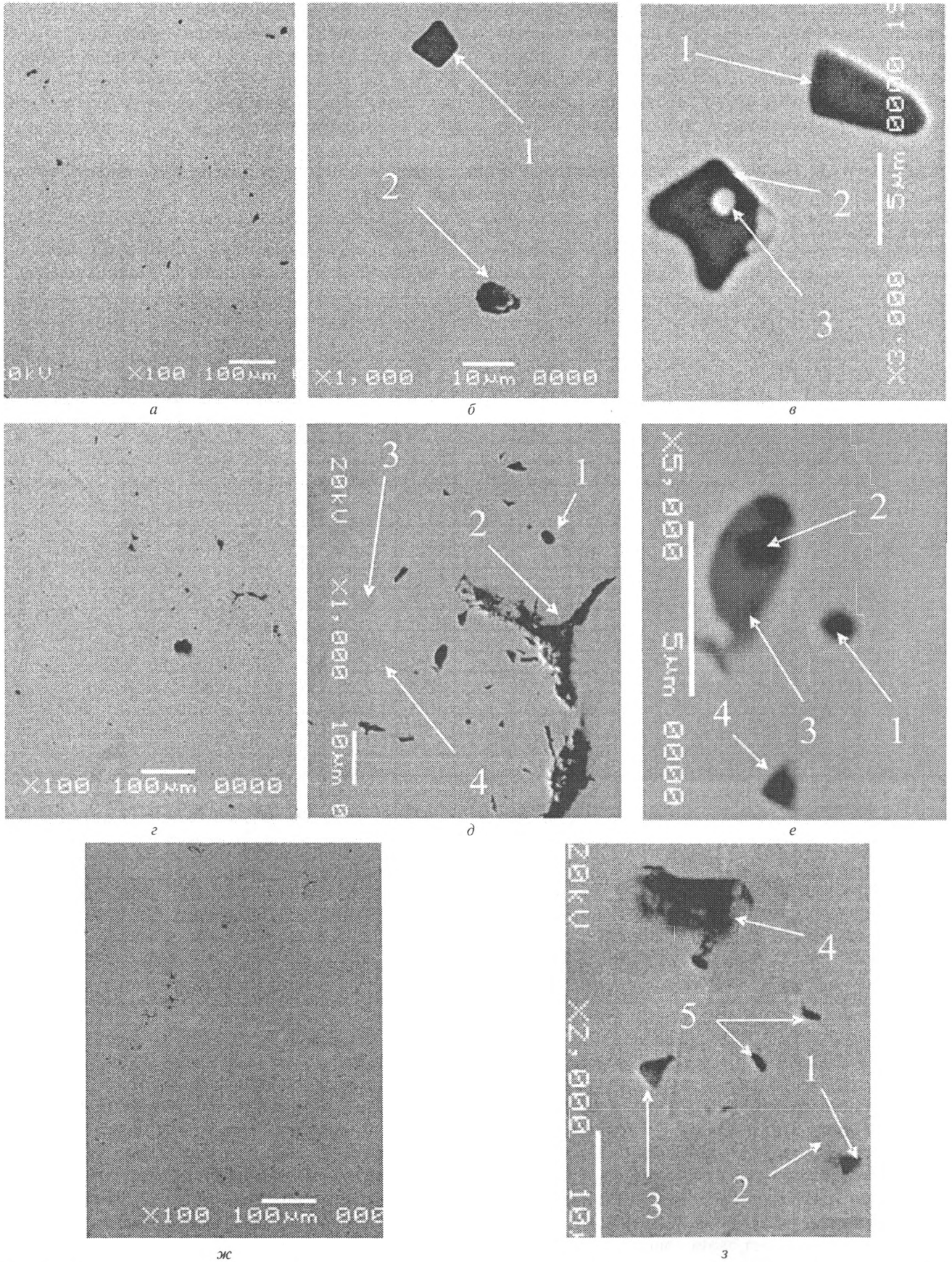


Рис. 2. Неметаллические включения (исследования методом сканирующей электронной микроскопии) в износостойкой аустенитной стали с пониженным содержанием марганца в закаленном состоянии: (а-в – плавка 57; г-е – плавка 58; ж, з – плавка 59. а, г, ж – x100; б, д, з – x1000; в – x3000; е – x5000

Раскисление алюминием (плавка 59) азотсодержащей износостойкой стали, содержащей 8,7% марганца (рис. 1, *з, д*), способствует получению в закаленном состоянии более чистых границ аустенитных зерен, количество и размер неметаллических включений уменьшаются (рис. 2, *ж*). Характерными включениями являются карбонитриды (с небольшим количеством хрома и ванадия) титана (поз. 1, рис. 2, *з*) на частичках марганцовистого цементита  $(Fe, Mn)_3C$  (поз. 2, рис. 2, *э*), комплексные выделения марганцовистого цементита  $(Fe, Mn)_3C$  и сульфидов

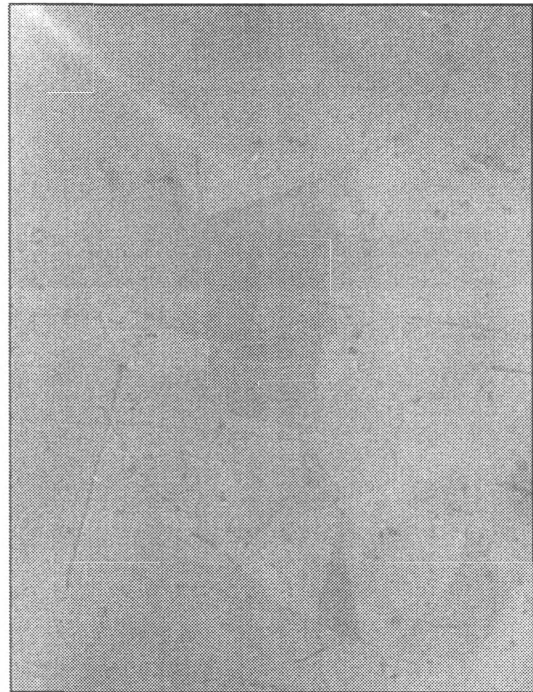
марганца (поз. 3, рис. 2, *з*), железомарганцевая шпинель (поз. 4, рис. 2, *э*), кремнийсодержащий марганцовистый цементит  $(Fe, Mn)_3C$  (поз. 4, рис. 2, *е*).

**Модифицированная титаном износостойкая сталь с пониженным содержанием марганца**

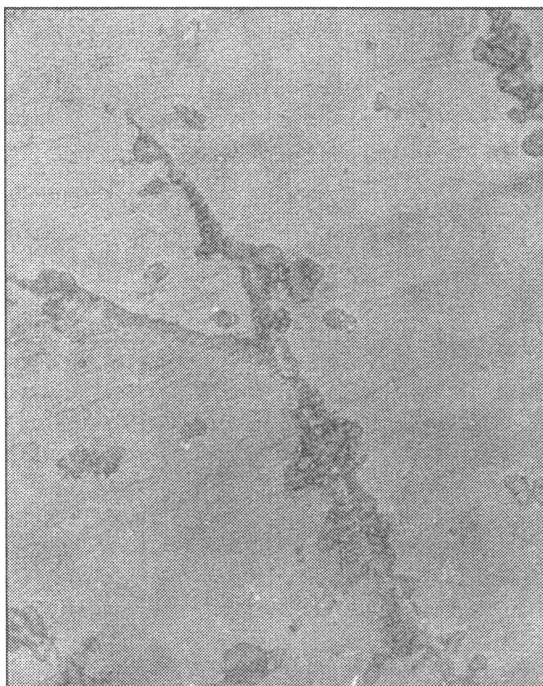
Исследовали стали с концентрацией марганца 6,90–8,87% (табл. 1). Сталь с 6,9% марганца (плавка 43) в литом состоянии является аустенитной со значительными карбидными выделениями по границам и полю зерна (рис. 3, *а*) и в



*а*



*б*



*в*



*г*

Рис. 3. Микроструктура (металлографические исследования) модифицированной титаном износостойкой аустенитной стали с пониженным содержанием марганца в литом (*а, в, г*) и закаленном (*б*) состояниях: *а, б* – плавка 43; *в* – плавка 44; *г* – плавка 49.  $\times 250$

закаленном от 1150°C состоянии присутствует значительное количество выделений (рис. 3, б). Вероятно, по полю зерна равномерно распределе-

ны карбиды (карбонитриды) титана. Состав (табл. 2) и характер (рис. 4, а, б) распределения неметаллических включений исследовали методом

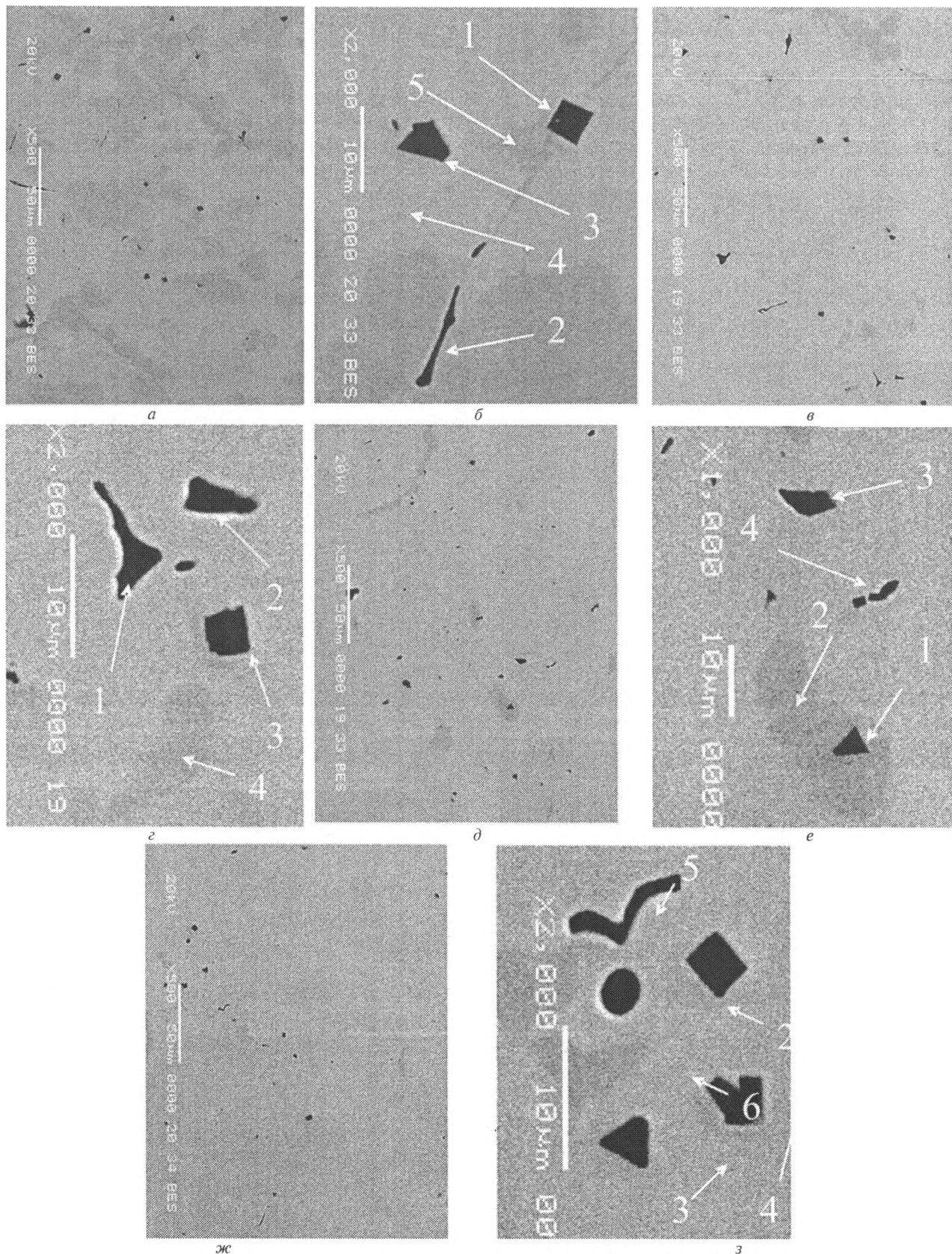


Рис. 4. Неметаллические включения (исследования методом сканирующей электронной микроскопии) в модифицированной титаном износостойкой аустенитной стали с пониженным содержанием марганца в закаленном состоянии: а, б – плавка 43; в, г – плавка 44; д, е – плавка 48; ж, з – плавка 49. а, в, д, ж – x500; б, г, з – x2000; е – x1000

сканирующей электронной микроскопии. Присутствуют кристаллические включения (не содержащие углерод) нитридов титана (поз. 1, рис. 4, б и поз. 3, рис. 4, б), продолговатые комплексные выделения марганцовистого цементита  $(Fe, Mn)_3C$  и сульфидов марганца (поз. 2, рис. 4, б), незначительно отличающиеся по химическому составу включения марганцовистого цементита  $(Fe, Mn)_3C$  (поз. 4, рис. 4, б и поз. 5, рис. 4, б) с невысоким содержанием марганца (до 6,80%).

Увеличение концентрации марганца до 7,92% (плавка 44) незначительно изменяет характер распределения неметаллических включений в литом состоянии (рис. 3, в), в то же время характер загрязненности выделениями закаленной стали принципиально меняется (рис. 4, в).

Присутствуют преимущественно комплексные неправильной формы выделения карбидов (с незначительным содержанием железа) и сульфидов марганца (поз. 1, рис. 4, г и поз. 2, рис. 4, г), кристаллы нитридов титана (поз. 3, рис. 4, г) и нерастворившиеся при закалке от 1150°C выделения марганцовистого цементита  $(Fe, Mn)_3C$  (поз. 4, рис. 4, г).

Дальнейшее повышение концентрации марганца до 9,03% (плавка 48) несколько увеличивает количество неметаллических включений (рис. 4, д) без заметного изменения их размеров. Встре-

чаются кристаллические включения нитридов титана (поз. 1, рис. 4, е) на фоне выделений марганцовистого цементита  $(Fe, Mn)_3C$  (поз. 2, рис. 4, е), компактные комплексные выделения магнетитовитановой шпинели (поз. 3, рис. 4, е) с наличием в составе карбидов титана, комплексные включения марганцовистого цементита  $(Fe, Mn)_3C$  и сульфидов марганца (поз. 4, рис. 4, е).

Введение азота (0,030%) в износостойкую сталь с 9,87% марганца (плавка 49) приводит к уменьшению количества и разрыву сплошной сетки карбидных выделений в литом состоянии (рис. 3, з) и понижению общей загрязненности стали неметаллическими включениями в закаленном состоянии (рис. 4, ж). Характерными включениями такой стали являются нитриды титана кристаллической формы (поз. 1, рис. 4, з, поз. 3, рис. 4, з и поз. 4, рис. 4, з), глобулярные и вытянутые комплексные выделения марганцовистого цементита  $(Fe, Mn)_3C$  и сульфидов марганца (поз. 2, рис. 4, з и поз. 5, рис. 4, з), нерастворившиеся при закалке от 1150°C выделения марганцовистого цементита  $(Fe, Mn)_3C$  (поз. 6, рис. 4, з).

Механические характеристики исследуемых сталей напрямую зависят от концентрации углерода и марганца в стали, а также вариантов модифицирования и микролегирования (табл. 3).

Таблица 3. Механические характеристики исследуемых сплавов

Номер плавки	Содержание элементов в стали, мас.%					Механические характеристики после закалки от 1050°C (плавки 57, 58, 59) и 1150°C (плавки 43, 44, 48, 49)				
	C	Mn	Si	Ti	N	$\sigma_{в}$ , МПа	$\sigma_{т}$ , МПа	KCU, МДж/м <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\psi$ , %
57	0,78	8,70	0,44	–	–	497	422	0,347	9,7	9,5
58	0,74	8,70	0,58	–	0,052	502	432	0,310	9,9	11,1
59	0,69	8,80	0,57	–	0,051	517	470	0,347	6,3	10,0
43	1,05	6,90	0,45	0,10	0,026	499	420	0,310	9,7	10,8
44	1,03	7,92	0,80	0,10	0,025	480	418	0,485	10,3	11,0
48	1,03	9,03	0,66	0,10	–	568	485	0,220	6,2	8,6
49	0,98	9,87	0,64	0,07	0,030	578	491	0,210	5,9	8,2

### Заключение

Основным типом неметаллических включений высокомарганцовистой стали классического состава являются не растворившиеся при закалке карбиды  $(Fe, Mn)_3C$  и включения сложных силикатов железа  $nFeO \cdot mMnO \cdot pSiO_2$ .

В износостойкой стали, содержащей 8,7% марганца, присутствуют компактные комплексные включения сульфидов и карбидов марганца, выделения железомарганцевых оксидов (содержащих карбиды  $(Fe, Mn)_3C$ ) и округлые включения марганцовистого цементита  $(Fe, Mn)_3C$  внутри сульфидов марганца.

В азотсодержащей (0,052% N) высокомарганцовистой стали, содержащей 8,7% марганца, присутствуют мелкие (до 2 мкм) округлые выделения, содержащие нитриды (карбонитриды) алюминия, железомарганцевых оксидов, комплексные грубые железохроммарганцевые карбидоксидные

выделения, включения марганцовистого цементита и такие же включения с незначительным содержанием карбонитридов титана, неоднородного состава выделения оксисульфидов марганца с включениями железной шпинели на фоне марганцовистого цементита  $(Fe, Mn)_3C$ , содержащего сульфиды марганца, а также кремнийсодержащий марганцовистый цементит  $(Fe, Mn)_3C$ .

В раскисленной алюминием азотсодержащей износостойкой стали с концентрацией марганца 8,7% основными включениями являются карбонитриды титана (с небольшим количеством хрома и ванадия) на частичках марганцовистого цементита  $(Fe, Mn)_3C$ , комплексные выделения марганцовистого цементита  $(Fe, Mn)_3C$  и сульфидов марганца, железомарганцевая шпинель, кремнийсодержащий марганцовистый цементит  $(Fe, Mn)_3C$ .

В стали с 6,9% марганца, модифицированной 0,1% титана и 0,026% азота, присутствуют крис-

таллические включения (не содержащие углерод) нитридов титана, продолговатые комплексные выделения марганцовистого цементита  $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$  и сульфидов марганца, включения марганцовистого цементита  $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$  с невысоким содержанием марганца (до 6,80%).

Увеличение концентрации марганца до 7,92% приводит к образованию преимущественно комплексных неправильной формы выделений карбидов (с незначительным содержанием железа) и сульфидов марганца, кристаллических нитридов титана и нерастворившиеся при закалке от 1150 °С выделений марганцовистого цементита  $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$ .

При дальнейшем повышении концентрации марганца до 9,03% присутствуют кристаллические включения нитридов титана на фоне выделений марганцовистого цементита  $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$ , компактные комплексные выделения магниевотитановой шпинели с наличием в составе карбидов титана, комплексные включения марганцовистого цементита  $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$  и сульфидов марганца.

При введении азота (0,030%) в износостойкую сталь с 9,87% марганца характерными включениями являются нитриды титана кристаллической формы, глобулярные и вытянутые комплексные выделения марганцовистого цементита

$(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$  и сульфидов марганца, нерастворившиеся при закалке от 1150 °С выделения марганцовистого цементита  $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$ .

Детали (зубья ковшей экскаваторов, молотки дробилок и др.) из экономнолегированной износостойкой аустенитной стали испытывали на ряде предприятий, получены положительные результаты и рекомендованы к использованию.

### Литература

1. Технические условия ТУ РБ 05750906.041. Отливки из сталей 110Г13Л, 110Г10Л, 110Г8Л.
2. Шульте Ю.А. Электрометаллургия стального литья. М.: Metallurgia, 1970.
3. Гарост А.И. Влияние модифицирования на характер первичной кристаллизации и свойства отливок высокомарганцовистой стали // Литье и металлургия. 2005. № 3. С. 51–57.
4. Гарост А.И. Влияние технологических факторов на структуру и свойства отливок высокомарганцовистой стали // Литье и металлургия. 2005. № 1. С. 126–131.
5. Гарост А.И. Неметаллические включения и формирование структуры модифицированной высокомарганцовистой стали // Литье и металлургия. 2006. № 1. С. 75–83.
6. Гарост А.И. Влияние микросостава высокомарганцовистой аустенитной стали на механические и эксплуатационные характеристики отливок // Литье и металлургия. 2006. № 2. Ч. 2. С. 118–127.
7. Гарост А.И. Природа и характер неметаллических включений в высокомарганцовистой стали // Литье и металлургия. 2006. № 3. С. 90–97.