



It is shown at the example of wear-resistant of high-manganese steel that mechanical and operating characteristics depend to a great extent on micro-composition of deoxidation, connected with peculiarities of its production, deoxidation melting, modifying and microalloying. The carried out investigations prove the expediency of insertion of 1,30-1,38% chrome for improvement of its quality.

А. И. ГАРОСТ, Белорусский государственный технологический университет

УДК 669.187.2:620.17

ВЛИЯНИЕ МИКРОСОСТАВА ВЫСОКО- МАРГАНЦОВИСТОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТЛИВОК

Неметаллические включения являются основной плавочной характеристикой стали. Степень загрязнения включениями, их природа и характер распределения оказывают однозначное влияние на процессы охрупчивания стали, особенно при низких температурах. Поэтому повышение общей степени чистоты и улучшение формы включений – важные факторы в повышении качественных показателей стали.

Природа неметаллических включений [1] в аустенитной высокомарганцевистой стали изучена недостаточно. Считалось, что образование включений в этой стали подчиняется закономерностям, известным для углеродистых сталей. А.А.Байков [2] следующим образом сформулировал условия, необходимые для получения качественной стали: минимум вредных примесей, отсутствие газовых пузырей и чистота стали по включениям. Борьба с вредными примесями и газами в электростали ведется успешно; получение же металла, чистого по неметаллическим включениям, не всегда достигается.

Металлографическими исследованиями [1] высокомарганцевистой стали, раскисленной алюминием, были обнаружены только глобулярные включения глинозема и шпинели, наличие кристаллических включений авторы не подтверждают.

В то же время известно, что в раскисленной алюминием стали всегда присутствуют кристаллические включения корунда и шпинели. В стали 110Г13Л продукты раскисления алюминием ошлаковываются окисью марганца и входят в раствор сложных высокомарганцевых алюмосиликатов. Независимо от размера присадки алюминия (до 0,2%) включения оставались глобулярными [1].

Исследования методом сканирующей электронной микроскопии природы неметаллических включений [3–5] указывают на присутствие в том числе кристаллических включений корунда.

Известно положительное влияние присадок хрома на износостойкость высокомарганцевистой стали в условиях ударно-абразивного износа [6]. Дополнительное легирование хромом отливок типа бронеконусов дробилок увеличивает срок их службы примерно на 30% [1].

В данной работе исследовали влияние хрома, а также хрома и азота на природу неметаллических включений, структуру и характеристики стали 110Г13Л. 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 жидкостеклянных самотвердеющих смесей, температуру заливки поддерживали постоянной – 1430 ± 10 °С.

В литом состоянии высокомарганцевистая сталь, содержащая 1,30% хрома (рис. 1, а), имеет аустенитную структуру с выделениями карбидов по границам и полю зерна. В результате закалки с 1150 °С карбиды полностью не растворяются и структура стали состоит из аустенита с карбидными выделениями, группирующимися у границ зерна (рис. 1, б). Исследования методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе ISM-5610LV методом электронно-зондового EDX анализа на детекторе IED 2201 природы неметаллических включений (рис. 1, в, г, д) указывают на наличие глобулярных включений (поз. 1, рис. 1, в) ортосиликата марганца (тефроита $2\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$) (табл. 2, плавка 17) 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 присутствуют характерные бескремнистые оксидные выделения гипоферрита марганца MnFeO_2 (поз. 2, рис. 1, в) с преимущественным содержанием окиси железа.

Присутствуют также включения марганцевой шпинели (поз. 1, рис. 1, з), содержащие карбиды титана (табл. 2, плавка 17), а также очень мелкие (до 2 мкм) глобулярные выделения железомар-

ганцевой шпинели (поз. 1, поз. 2, рис. 1, д) с непостоянным составом по металлическим элементам, содержащие в небольшом количестве карбиды хрома (поз. 2, рис. 1, д).

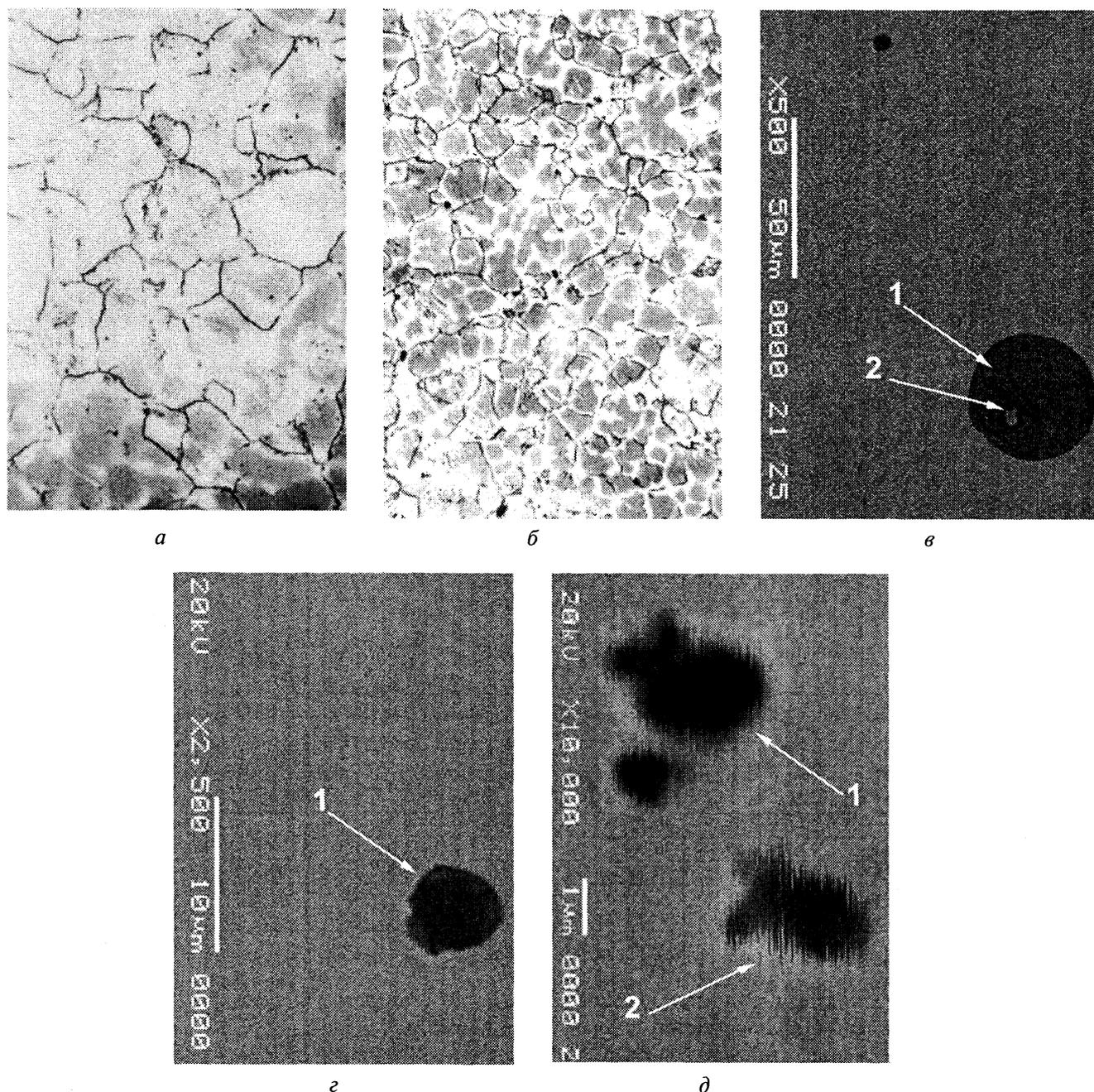


Рис. 1. Микроструктура стали 110Г13Л с 1,30% хрома в литом (а) и закаленном (б–д) состояниях (плавка 17): металлографические исследования (а, б); исследования методом сканирующей электронной микроскопии (в–д). а – х200; б – х100; в – х2500; д – х10 000

Таблица 1. Химический состав опытных плавков аустенитной высокомарганцевистой стали

Номер плавки	Содержание элементов, мас. %						
	C	Mn	Si	Cr	N	S	P
17	1,10	12,20	0,80	1,30	–	0,006	0,065
36	1,15	12,98	0,86	1,38	0,028	0,007	0,060
37	1,08	12,86	0,90	1,33	0,080	0,007	0,062
13	1,11	12,99	0,79	1,38	0,109	0,005	0,065
14	1,10	13,30	0,83	3,00	0,107	0,005	0,068
15	1,10	12,70	0,74	4,64	0,110	0,005	0,058

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

Номер плавки	Позиция включения	Содержание элементов, мас. %											
		C	O	Si	P	S	Al	Mn	Cr	Ti	Ca	N	Fe
17	1(рис.1, в)	17,82	38,51	8,83	0,01	0,94	1,56	30,63	1,20	0,50	–	–	–
	2(рис.1, в)	23,18	19,34	0,21	–	–	0,05	9,53	1,03	0,23	–	–	46,44
	1(рис.1, г)	10,39	36,93	0,31	–	0,59	20,52	26,31	1,01	3,69	–	–	0,25
	1(рис.1, д)	8,86	38,42	–	0,14	0,31	29,69	11,97	1,48	0,17	–	–	8,96
	2(рис.1, д)	18,51	22,87	0,20	0,13	0,16	15,81	8,94	3,20	0,14	–	–	30,04
36	1(рис.3, а)	33,09	–	0,23	0,03	15,09	–	32,99	2,14	3,21	–	–	13,24
	2(рис.3, б)	12,31	–	–	0,27	8,87	0,52	23,09	1,74	0,36	–	–	52,84
	4(рис.3, а)	6,22	–	0,66	–	–	3,03	7,50	4,10	34,56	–	10,28	33,65
	3(рис.3, а)	12,27	12,64	0,01	–	–	7,08	6,51	3,53	20,55	–	7,48	29,94
	3(рис.3, б)	12,37	42,85	0,02	0,27	0,02	34,20	6,40	0,65	1,59	–	–	1,64
	1(рис.3, в)	–	3,82	–	0,01	–	1,29	2,29	3,95	62,72	–	14,79	11,13
	1(рис.3, г)	3,27	39,74	0,16	0,17	–	13,06	2,77	1,02	34,39	–	2,12	3,31
37	2(рис.3, в)	21,78	2,41	0,10	–	20,90	–	45,71	1,32	–	–	–	7,78
	2(рис.3, г)	19,16	2,11	–	–	12,09	0,19	28,74	2,25	0,26	0,03	–	35,16
	3(рис.3, в)	22,51	15,01	0,25	0,03	7,13	7,70	18,28	1,34	–	–	–	27,74
	1(рис.3, д)	15,62	9,80	0,01	–	6,11	0,25	14,61	2,54	20,11	–	6,72	24,23
	2(рис.3, д)	19,97	7,35	1,45	0,01	11,24	4,78	34,18	0,67	4,95	0,02	2,30	13,11
	4(рис.3, в)	2,79	35,82	0,71	–	0,83	19,89	24,41	1,55	3,36	–	–	11,14
13	1(рис.3, з)	6,89	8,73	2,91	–	1,44	1,83	16,32	1,43	1,19	0,23	–	59,02
	1(рис.3, и)	–	40,75	13,78	–	–	–	45,47	–	–	–	–	–
	1(рис.5, д)	11,62	32,73	9,89	–	2,19	3,78	34,23	1,27	0,43	–	–	3,85
	2(рис.5, д)	9,31	10,15	4,32	–	2,33	0,33	24,37	2,56	–	0,01	–	46,61
	3(рис.5, д)	16,47	9,42	4,08	0,08	0,56	0,94	18,28	2,03	1,21	0,10	–	46,84
15	1(рис.5, е)	52,31	23,03	0,68	0,15	0,18	0,46	2,69	2,07	–	0,90	–	17,53
	2(рис.5, е)	20,85	43,75	22,48	0,12	–	–	0,32	1,71	0,01	0,02	2,34	8,39
	1(рис.5, ж)	21,84	19,06	6,22	0,56	–	3,76	6,02	3,13	0,33	–	–	39,07
	2(рис.5, ж)	19,84	1,49	0,38	0,47	19,58	0,06	43,28	2,75	1,38	–	–	10,78
	1(рис.5, з)	83,24	14,34	0,26	–	0,11	–	0,45	0,07	–	0,17	–	1,05
	2(рис.5, з)	25,38	19,09	5,10	0,48	0,06	0,43	5,55	3,60	–	–	–	40,31

В высокомарганцевистой стали классического состава [4] преимущественно присутствуют нерастворившиеся при закалке карбиды $(FeMn)_3C$.

Введение азота (0,028–0,109%) в хромсодержащую (1,30–1,38%Cr) высокомарганцевистую сталь (табл. 1, плавки 13, 36, 37) не изменяет величину зерна аустенита (кристаллизуются зерна 4–5-го балла), при этом в литом состоянии карбиды располагаются преимущественно по границам зерна (рис. 2). Во время нагрева под закалку и выдержки при 1150 °С не удается полностью растворить карбиды, в которые входит хром (рис. 2, б, г). Более высокий нагрев (до 1200 °С) обеспечивает получение однофазной аустенитной структуры (рис. 2, е). Для уточнения результатов металлографических исследований изучали природу неметаллических включений

(рис. 3) методом сканирующей электронной микроскопии.

Обнаруживаемые угловатые дезориентированные включения (поз. 1, рис. 3, а и поз. 2, рис. 3, б) в высокомарганцевистой стали, содержащей 0,028% N (табл. 2, плавка 36), являются сульфидами марганца и железа, осажденными из жидкой стали на многочисленных кристалликах карбидов титана и хрома (темный фон на включениях), присутствуют также продолговатые включения той же природы (поз. 2, рис. 3, а и поз. 4, рис. 3, б). В этой же стали четко дифференцируются прямоугольные включения комплексных карбонитридов титана, хрома и алюминия (поз. 3 и 4, рис. 3, а и поз. 3, рис. 3, б) с повышенным содержанием кислорода (12,64%) в центрах таких выделений (темный фон на включениях), при-

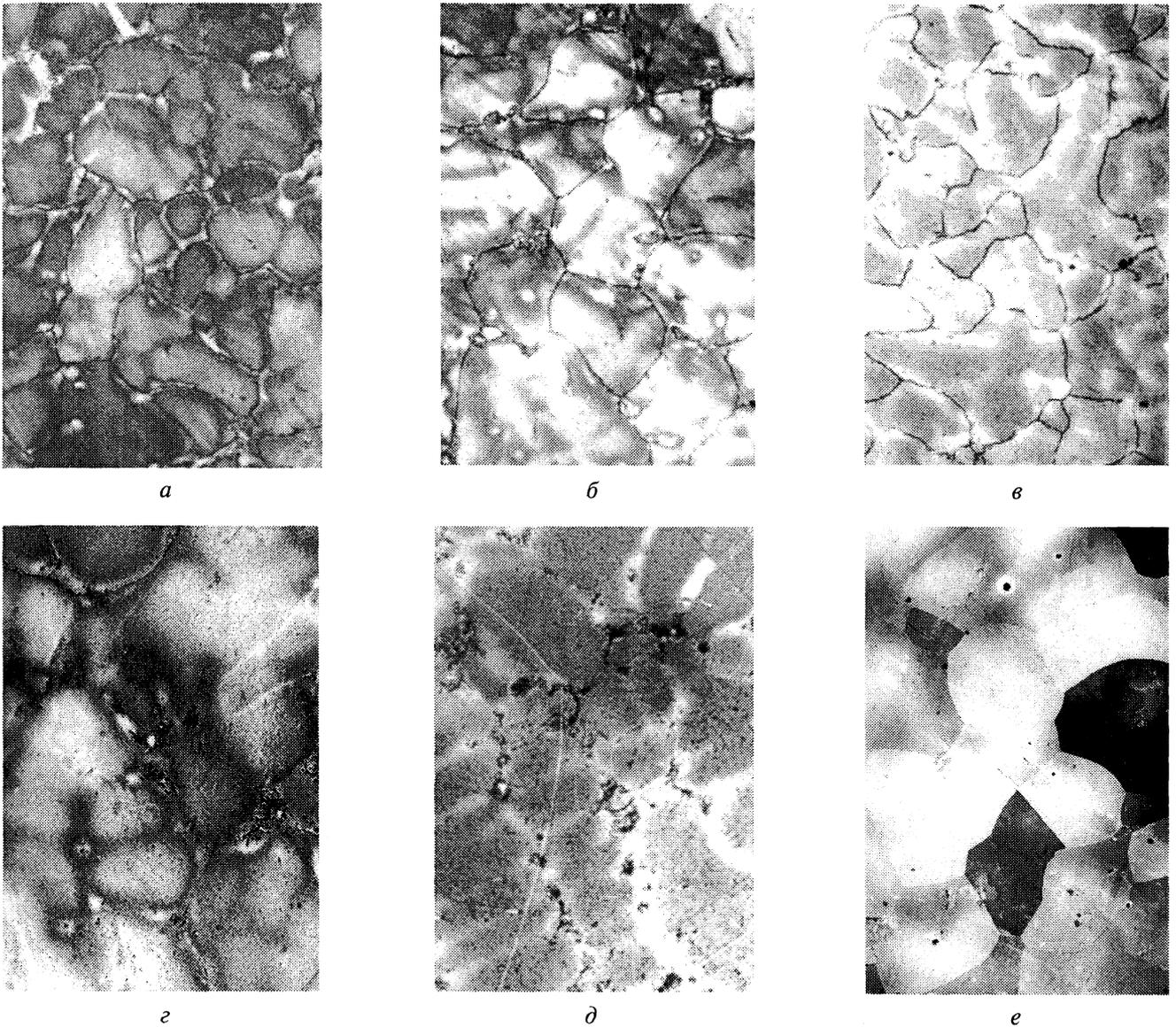


Рис. 2. Микроструктура стали 110Г13Л, содержащей 1,38% хрома, с различной концентрацией азота в литом (а-в) и закаленном (з-е) состояниях: а, з – 0,028% N (плавка 36); б, д – 0,080% N (плавка 37); в, е – 0,109% N (плавка 13). а, б, в, е – х200; з, д – х320

существуют также кристаллические включения (поз. 1, рис. 3, б) корунда (Al_2O_3).

Повышение концентрации азота до 0,080% (табл. 2, плавка 37) способствует образованию включений комплексных нитридов (карбонитриды практически отсутствуют) титана, хрома и алюминия (поз. 1, рис. 3, в и поз. 1, рис. 3, з) на комплексных кристаллах (темный фон на включениях) железной шпинели (герценита) и карбидов титана (поз. 2, рис. 3, в и поз. 2, рис. 3, з), угловатых дезориентированных включений (поз. 1, рис. 3, д и поз. 3, рис. 3, в) сульфидов марганца и железа, а также подобных включений (поз. 2, рис. 3, д и поз. 4, рис. 3, в) на комплексных кристаллах (темный фон на включениях) железной шпинели (поз. 3, рис. 3, д, поз. 4, рис. 3, в).

Дальнейшее повышение концентрации азота в стали до 0,109% (табл. 2, плавка 13) способствует

образованию скоплений угловатых дезориентированных включений, содержащих в качестве центров нитриды (карбонитриды) титана, гипоферрита марганца $MnFeO_2$ (поз. 1, рис. 3, е), образованных в жидкой стали вследствие понижения растворимости азота и кислорода по мере снижения температуры, на которых в дальнейшем осаждаются выпадающие из раствора сульфиды. Присутствуют также глобулярные комплексные включения (табл. 2, плавка 17) марганцевой шпинели (поз. 2, рис. 3, ж и поз. 2, рис. 3, е), содержащие карбиды титана (темная часть) совместно с карбонитридами титана (светлая часть включения) и марганцовистого цементита $(FeMn)_3C$ (поз. 1, рис. 3, ж и поз. 2, рис. 3, е), а также очень мелкие глобулы (диаметром менее 1 мкм) гипоферрита марганца $MnFeO_2$ (поз. 1, рис. 3, з) и кристаллы ортосиликата марганца (тефроита $2MnO \cdot SiO_2$) (поз. 1, рис. 3, и) внутри глобулярных включений.

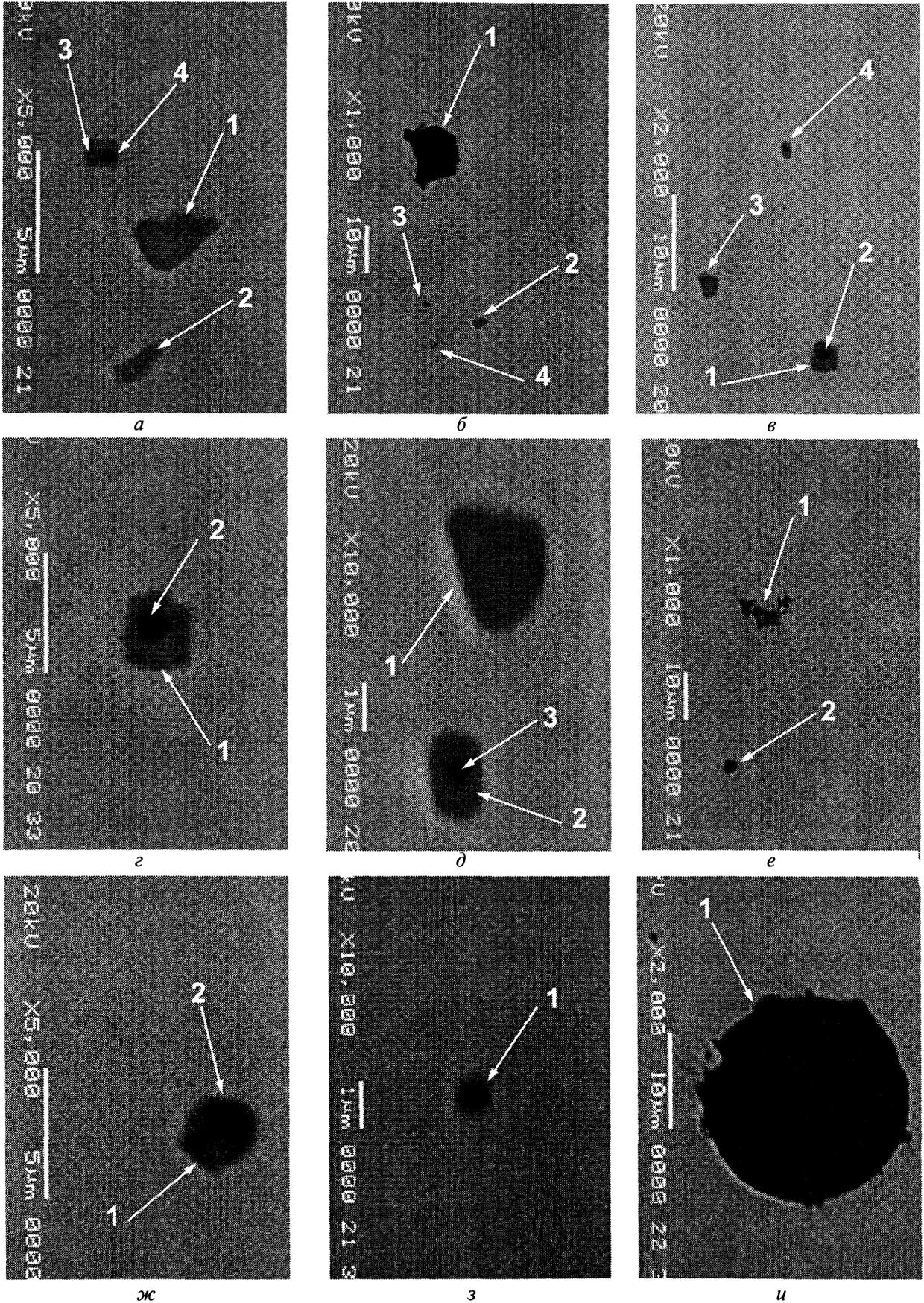


Рис. 3. Основные типы включений в закаленной высокомарганцевистой стали 110Г13Л, содержащей 1,38% хрома, с различной концентрацией азота (исследования методом сканирующей электронной микроскопии): а, б – 0,028% N (плавка 36); в – 0,080% N (плавка 37); г – 0,090% N; е – 0,109% N (плавка 13). а – х5000; б – х1000; в – х2000; г – х5000; д – х10 000; е – х1000; ж – х5000; з – х10 000; и – х2000

Структура этой же стали (плавка 13), изученная по методу реплик на электронном микроскопе ЭМ-14, указывает также на присутствие мелкодисперсных равномерно расположенных внутри аустенитного зерна включений (рис. 4), природа которых более подробно исследована методами сканирующей электронной микроскопии (табл. 2, рис. 3).

В микроструктуре стали, содержащей 3% Cr и 4,64% Cr в литом состоянии, кроме сетки карбидов, по границам зерен встречаются также участки так называемой карбидной эвтектики (структура типа грубопластинчатого перлита (рис. 5 а, в)). Во время нагрева под закалку и выдержки при 1150 °С не удается полностью растворить карбиды, в которые входит хром, и образуется аустенитная структура (рис. 5, б, г) со значительным содержанием неметаллических включений по границам и полю зерна, природа которых изучалась методом сканирующей электронной микроскопии (рис. 5, д-з).

В стали, содержащей 3% Cr и 0,107% N (плавка 14), присутствуют глобулярные включения (поз. 1, рис. 5, д) ортосиликата марганца (тефроита $2MnO \cdot SiO_2$), а также угловатые дезориентированные и глобулярные включения сложных силикатов железа ($nFeO \cdot mMnO \cdot pSiO_2$) с небольшим содержанием сульфидов марганца и карбидов хрома (поз. 2 и 3, рис. 5, д). При более высоком содержании хрома (4,64%) характер, состав и распределение включений претерпевают изменения. Присутствуют глобулярные включения (поз. 1, рис. 5, е) закиси железа при высокой концентрации углерода, причем подобные графитные выделения (поз. 1, рис. 5, з), природу которых в дальнейшем необходимо уточнять, присутствуют и на фоне нерастворившегося при закалке марганцовистого цементита $(Fe Mn)_3C$ (поз. 2, рис. 5, з). В этой же стали обнаруживаются угловатые дезориентированные комплексные включения метасиликата железа ($FeO \cdot SiO_2$) и карбонитрида хрома (поз. 2, рис. 5, е), а также очень мелкие (до 2 мкм) глобулярные выделения (поз. 1, рис. 5, ж) алюмокремниймарганцевых силикатов на включениях карбидов титана и хрома и одновременно комплексных выделений сульфидов марганца и железа на включениях карбидов титана и хрома (поз. 2, рис. 5, ж).

Введение 1,30% хрома в высокомарганцовистую аустенитную сталь (плавка 17) приводит к повышению прочностных характеристик, при этом характеристики пластичности и ударной вязкости понижаются (табл. 3) по отношению к стали 110Г13Л классического состава [3]. Легирование азотом позволяет значительно повысить прочностные характеристики высокомарганцовис-

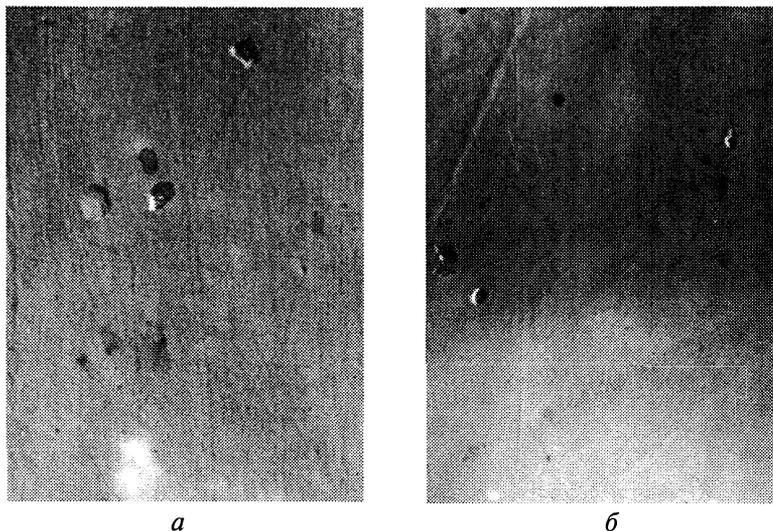


Рис. 4. Электронные микрофотографии структуры закаленной стали 110Г13Л, легированной 1,3% хрома и 0,109% азота

той стали, содержащей 1,30–1,38% хрома (плавки 36, 37, табл.2), при этом характеристики пластичности не понижаются. При более высокой концентрации хрома (3,0 и 4,64%) сохраняется положительная закономерность влияния на механические показатели стали (плавки 14 и 15, табл. 3).

Для более глубокого исследования фазового состава стали 110Г13Л, содержащей хром, а также хром и азот, проводили электрохимическое выделение карбидного осадка в соответствии с методикой [5]. Электролит с растворенными в нем элементами подвергался химическому анализу, а карбидный (карбонитридный) осадок — химическому, рентгенофазовому и электронно-микроскопическому исследованиям.

Введение хрома приводит к увеличению массового содержания карбидного осадка как в литом, так и закаленном состояниях (табл. 4). Легирование азотом хромсодержащей высокомарганцовистой стали способствует дальнейшему росту массовой доли карбонитридного осадка, причем более значительный рост наблюдается для литого состояния.

Введение азота в хромсодержащую высокомарганцовистую сталь способствует росту концентрации хрома в карбонитридном осадке и вытеснению марганца в твердый раствор (табл. 5). Повышение концентрации азота в стали приводит к увеличению его содержания в карбонитридной фазе.

Проводили также качественные исследования карбонитридной фазы, при которых анодный осадок подвергался рентгеноструктурному анализу. Анализ полученных рентгенограмм показывает, что карбидный осадок литой хромсодержащей высокомарганцовистой стали (плавка 17) состоит преимущественно из карбидов Cr_7C_3 и $Cr_{23}C_6$ и нитридов хрома CrN . Нитриды хрома образуются при взаимодействии хрома с азотом, небольшое количество которого (около 0,01%) практически всегда присутствует в стали. В карбонитридном осадке встречается также небольшое количество

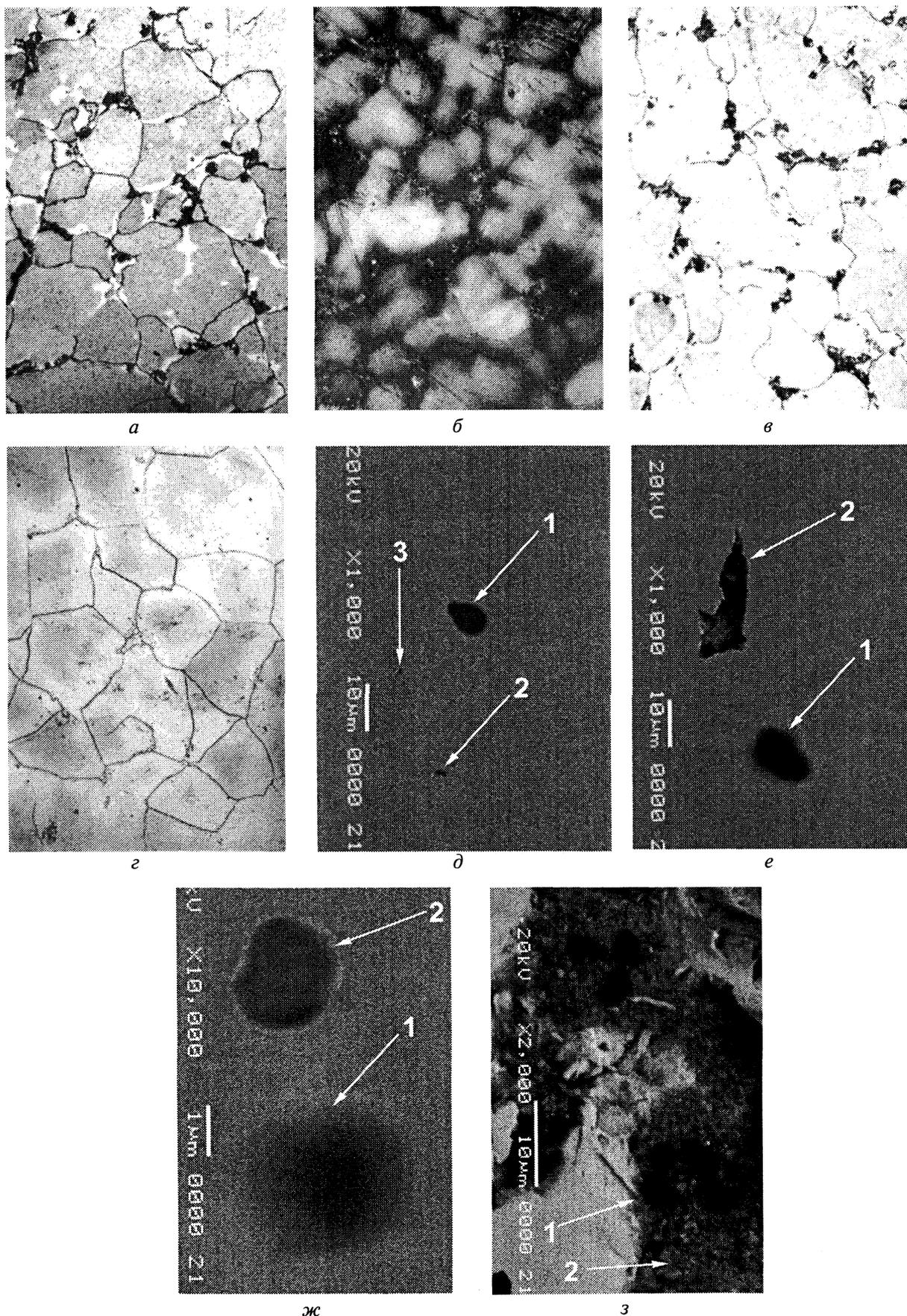


Рис. 5. Микроструктура стали 110Г13Л, содержащей хром и азот, в литом (а, в) и закаленном (б, з-з) состояниях (металлографические исследования (а-г); исследования методом сканирующей электронной микроскопии (д-з)); а, б, д – 3% Cr и 0,107% N (плавка 14); в, г, е, ж, з – 4,64% Cr и 0,110% N (плавка 15). а – х200; б – х320; в – х200; г – х200; д – х1000; е – х1000; ж – 10000; з – 2000

Таблица 3. Механические характеристики исследуемых сплавов

Номер плавки	Содержание добавок в стали, мас.%		Механические характеристики					
	Cr	N	σ_b , МПа	σ_r , МПа	KCU, МДж/м ²	δ , %	ψ , %	НВ, МПа
17	1,30	–	705	510	1,1	20,0	18,0	2070
36	1,38	0,028	815	515	2,0	29,0	19,5	2070
37	1,33	0,08	780	450	1,7	33,0	27,0	2290
13	1,38	0,109	725	415	3,0	20,0	25,0	2170
14	3,00	0,107	795	445	2,7	23,0	19,0	2410
15	4,64	0,110	725	445	2,7	24,0	23,0	2290

Таблица 4. Количество карбидной фазы в аустенитной высокомарганцевистой стали

Номер плавки	Содержание легирующих элементов, мас.%		Количество карбидной фазы, мас.%	
	Cr	N	литое состояние	после закалки
2[5]	–	–	2,3	1,8
17	1,30	–	2,6	1,9
36	1,38	0,028	2,9	2,1
37	1,33	0,080	3,7	2,4
13	1,38	0,109	4,6	2,7

Таблица 5. Химический состав анодного осадка (карбонитридной фазы) высокомарганцевистой стали

Номер плавки	Содержание легирующих элементов, мас.%		Содержание легирующих элементов в анодном осадке, мас.%					
			Mn		Cr		N	
	Cr	N	литое состояние	после закалки	литое состояние	после закалки	литое состояние	после закалки
17	1,30	–	7,20	7,82	10,12	13,18	–	–
36	1,38	0,028	5,48	5,56	10,51	15,71	0,320	0,425
37	1,33	0,08	3,26	3,82	11,37	21,36	1,232	1,621
13	1,38	0,109	2,96	3,12	12,98	25,17	1,581	2,012

карбидов Cr₃C₂. Легирование 0,028% азота (плавка 36) существенно не влияет на фазовый состав карбидной (карбонитридной) фазы, отмечается только некоторое повышение количества включений CrN. Введение 0,109% азота (плавка 13) приводит к заметному повышению содержания нитридов хрома CrN в литой высокомарганцевистой стали, при этом в карбонитридном осадке предпочтительно присутствуют карбиды Cr₇C₃ и не обнаруживаются включения Cr₃C₂ и Cr₂₃C₆.

Из рентгенограмм закаленной стали, легированной 1,38% хрома и 0,109% азота (плавка 13), видно, что преимущественным включением является нитрид хрома CrN. Обнаруживаются также включения карбидов Cr₇C₃ и небольшое количество карбидов Cr₂₃C₆.

Для изучения формы, размеров и структуры карбонитридных включений электролитически выделенный анодный осадок (карбонитридная фаза) стали 110Г13Л, содержащей 1,38% Cr и 0,109%N, подвергался исследованиям на электронном микроскопе ЭМ-14 (рис.6). В литом состоянии встречаются включения компактной формы с размерами, не превышающими 1,5 мкм, и дендритные включения длиной до 20 мкм и шириной до 5 мкм (рис. 6, а, б) с хорошо

выраженными осями первого и второго порядков. Можно предположить, что такие включения располагаются по границам аустенитных зерен и способствуют охрупчиванию литой стали. В термически обработанном состоянии отмечается значительное измельчение включений до 1–3 мкм и менее (рис. 6, в, г).

Испытания на ударно-абразивный износ проводили в шаровой мельнице по методике [5]. Оценка износостойкости сталей характеризовалась величиной относительного износа. За эталон принят износ закаленного образца стали 110Г13Л классического состава [5] (плавка 2). Износостойкость других образцов рассчитывали по отношению к эталонному. Легирование 1,30% хрома (без добавок азота) приводит к уменьшению относительного износа на 15% при испытаниях на сухой износ и на 18% при влажном износе. Наиболее высокие показатели износостойкости получены при 0,080% азота, при этом коэффициент повышения стойкости составляет 1,73 (без введения азота в сталь – 1,20) (рис. 7).

Результаты исследований позволили разработать новый состав износостойкой высокомарганцевистой стали, который защищен авторским свидетельством № 1289906.

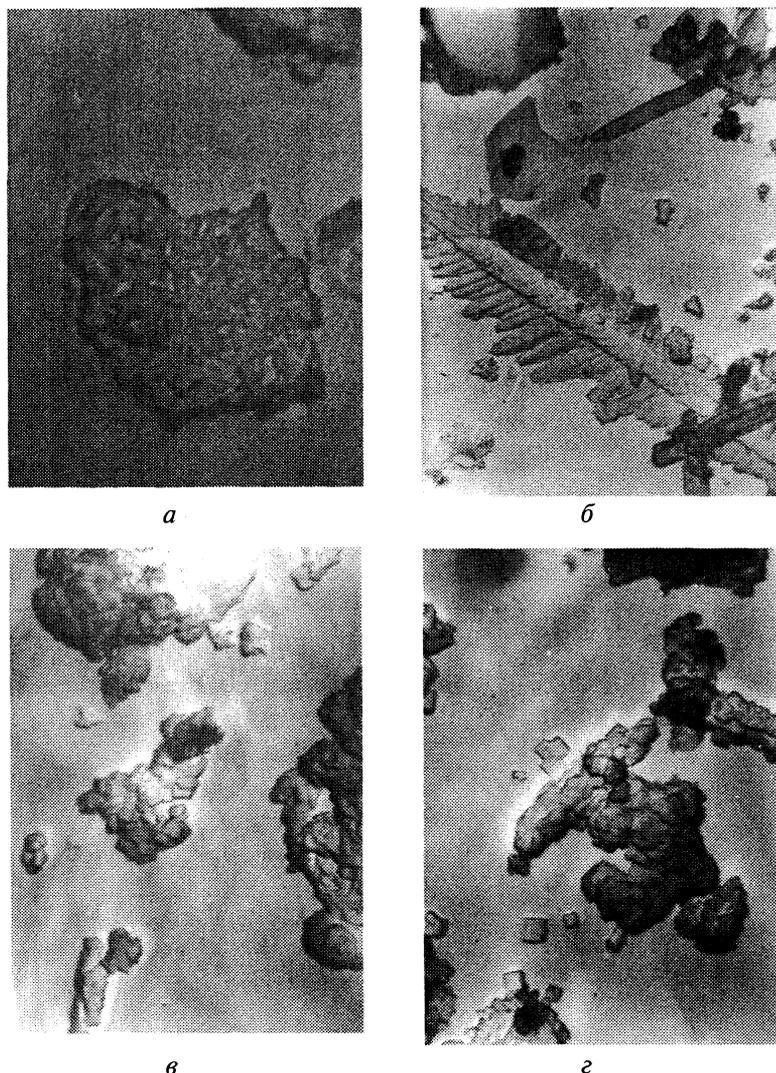


Рис. 6. Электронные микрофотографии карбидного осадка, выделенного электролитически, из образцов стали 110Г13Л, легированной 1,38 % хрома и 0,109% азота: а, б – в литом состоянии; в, г – после закалки с 1200 °С. а – х20 000; б–г – х8000

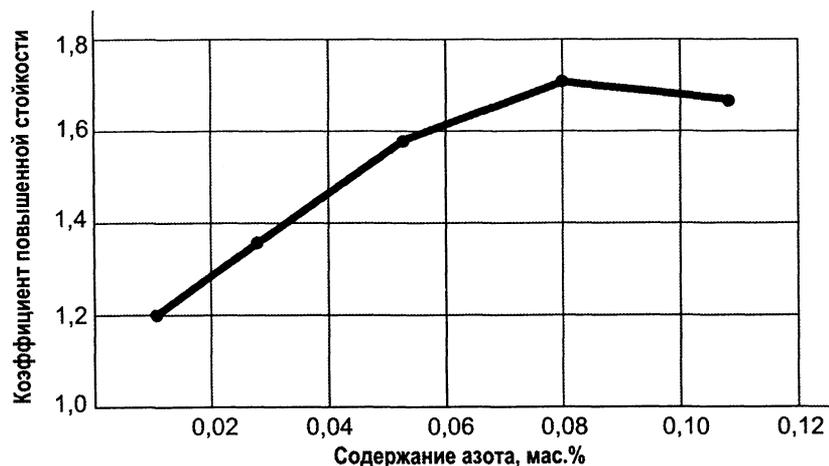


Рис. 7. Влияние азота на износостойкость стали 110Г13Л, содержащей 1,30–1,38% хрома

Выводы

В стали 110Г13Л классического состава присутствуют в основном нерастворившиеся при закалке карбиды $(FeMn)_3C$ в виде сфероидизированных вкраплений. Легирование 1,30% хрома изменяет тип и распределение включений, при этом преобладают глобулярные duplexные бескремнистые оксидные выделения гипоферрита марганца $MnFeO_2$ в ортосиликате марганца (тефроите $2MnO \cdot SiO_2$), содержащего карбиды титана и хрома, а также включения марганцевой шпинели с карбидами титана и очень мелкие (до 2 мкм) глобулярные выделения железомарганцевой шпинели с непостоянным составом по металлическим элементам, содержащие в небольшом количестве карбиды хрома. Такие включения равномерно распределены в металлической матрице, имеют значительно меньшие размеры и способствуют повышению механических и эксплуатационных характеристик высокомарганцевистой стали.

Введение азота (0,028%) в хром-содержащую (1,30%Cr) высокомарганцевистую сталь позволяет обнаружить прямоугольные включения комплексных карбонитридов титана, хрома и алюминия с повышенным содержанием кислорода (12,64%) в центрах таких выделений, кристаллические включения корунда (Al_2O_3), а также осажденные из жидкой стали на многочисленных кристалликах карбидов титана и хрома сульфиды марганца и железа. При большей концентрации азота (0,080%) выделяются комплексные нитриды титана, хрома и алюминия на кристаллах железной шпинели и карбидах титана, также выделяются сульфиды на кристаллах железной шпинели.

При содержании 3% Cr и 0,107% N присутствуют глобулярные включения ортосиликата марганца (тефроита $2MnO \cdot SiO_2$) и угловатые дезориентированные и глобулярные включения сложных силикатов железа ($nFeO \cdot mMnO \cdot pSiO_2$) с небольшим содержанием сульфидов марганца и карбидов хрома. Дальнейшее повышение концентрации хрома до 4,64%

приводит к образованию угловатых дезориентированных комплексных включений метасиликата железа ($\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$) и карбонитрида хрома, а также очень мелких (до 2 мкм) глобулярных выделений алюмокремниймарганцевых силикатов на включениях карбидов титана и хрома и одновременно комплексных выделений сульфидов марганца и железа на включениях карбидов титана и хрома. Присутствуют также глобулярные включения закиси железа при высокой концентрации углерода, причем подобные графитные выделения, природу которых в дальнейшем необходимо уточнять, присутствуют и на фоне нерастворившегося при закалке марганцовистого цементита $(\text{Fe Mn})_3\text{C}$.

Проведенные исследования свидетельствуют о целесообразности введения в высокомарганцовис-

тую сталь 1,30–1,38% хрома для улучшения механических и эксплуатационных характеристик.

Литература

1. Шульте Ю.А. Электрометаллургия стального литья. М.: Metallurgia, 1970.
2. Байков А.А. Собрание трудов. Т. 2. М.: Изд-во АН СССР, 1948.
3. Гарост А.И. Неметаллические включения и формирование структуры модифицированной высокомарганцовистой стали // Литье и металлургия. 2006. № 1. С. 75–83.
4. Гарост А.И. Влияние модифицирования на характер первичной кристаллизации и свойства отливок высокомарганцовистой стали // Литье и металлургия. 2005. № 3. С. 51–57.
5. Гарост А.И. Влияние технологических факторов на структуру и свойства отливок высокомарганцовистой стали // Литье и металлургия. 2005. № 1. С. 126–131.
6. Violi Giuseppe Fonderie ital. 1961. Vol. 10. N. 1. P. 5–10.