



The ways of optimization of the technological factors for receiving of high-manganese steel with increased exploitation characteristics are offered. The influence of addition elements of nitrogen on the structure, mechanical and exploitation characteristics is studied.

А. И. ГАРОСТ, Белорусский государственный технологический университет

УДК 669.187.2:620.17

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ОТЛИВОК ВЫСОКОМАРГАНЦОВИСТОЙ СТАЛИ

Среди многочисленных марок стали, применяемых для производства фасонного литья, особое место занимает высокомарганцевистая аустенитная, являющаяся самой распространенной высоколегированной сталью для отливок. Отсутствие дефицитных составляющих в этой стали в сочетании с высокими физико-механическими свойствами обусловило исключительную экономичность и массовость ее применения. Сортамент изделий из этой стали многообразен: конусы и щеки дробилок, бронифутеровки мельниц, детали ковшей экскаваторов и землечерпалок, гусеничные траки, железнодорожные стрелки и крестовины, множество других деталей и приспособлений.

Состав стали 110Г13Л характеризуется очень широкими пределами содержания углерода (0,9–1,5%) и марганца (11–15%), что отрицательно сказывается на стабильности свойств разных плавков. Соотношение содержаний марганца к углероду по литературным данным должно быть более 10 [1–3]. Высокомарганцевистая сталь отличается высоким содержанием фосфора (до 0,12%), который вносится при легировании ферромарганцем, содержащим 0,30–0,45%. В промышленных плавках, проведенных на Восточно-Казахстанском машиностроительном заводе (ВКМЗ), содержание фосфора обычно составляет 0,032–0,106% (проанализировано более 120 плавков), что отрицательно сказывается на ее свойствах. В то же время предусмотренное ГОСТ 2176-77 содержание серы до 0,05% является завышенным. Фактически в проанализированных промышленных плавках вследствие обессеривающей способности марганца содержание серы не превышает 0,032%.

Высокое содержание марганца и углерода обеспечивает аустенитную структуру отливок даже в условиях медленного охлаждения (рис. 1, а). Однако такая структура характеризуется наличием выпавших из твердого раствора отдельных крупных карбидов $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$ и участков перлитной смеси (феррит + карбиды). Они образуют

почти сплошную оторочку вокруг аустенитных зерен. Встречаются также отдельные карбиды сфероидальной формы внутри зерен. Образуется разнотеренная структура с баллом зерна от 1 до 3, преимущественно балл 2 (ГОСТ 5639-87). Такая сталь обладает низкими показателями прочности, пластичности и вязкости. Во время выдержки при закалке в интервале температур 1050 – 1150°C карбиды растворяются и после охлаждения в воде фиксируются относительно чистые зерна аустенита (рис. 2).

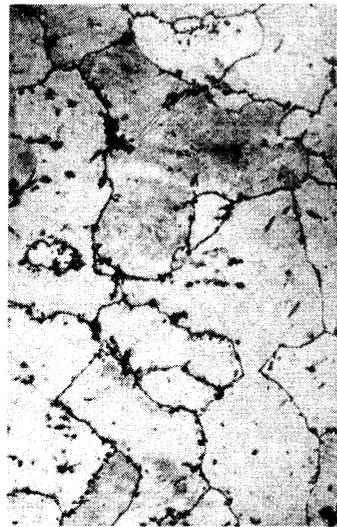
Наличие чисто аустенитной структуры недостаточно для получения высоких механических свойств и износостойкости отливок. Установлено [4], что качество этой стали в значительной степени определяется величиной зерна аустенита. Более высокими показателями обладают мелкозернистые стали. В отливках из аустенитной стали, не имеющих фазовых превращений, получение мелкозернистой структуры может быть достигнуто только путем регулирования процессов кристаллизации жидкой стали. Это достигается регулированием температуры заливки или вводом добавок, обеспечивающих в том числе модифицирующий эффект.

Для крупных отливок горнометаллургического оборудования рекомендуется температура выпуска из печи 1500–1520°C и температура начала разливки 1420–1450°C. Однако при заливке не всегда удается поддерживать температуру в заданных пределах. Дополнительное введение добавок позволяет получить более устойчивые результаты.

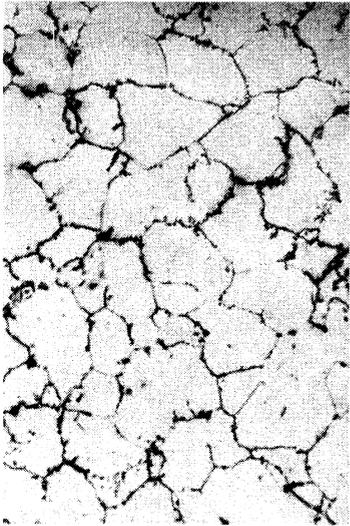
В данной работе исследовали влияние азота на структуру и характеристики стали 110Г13Л. Для этого проведена серия плавков в индукционных печах ИСТ-016 и ИСТ-1 на Восточно-Казахстанском машиностроительном заводе (табл. 1). Для обеспечения идентичных условий кристаллизации образцы заливали в форму из жидкостекольных самотвердеющих смесей и температура заливки поддерживалась постоянной – 1430°C ± 10°C.



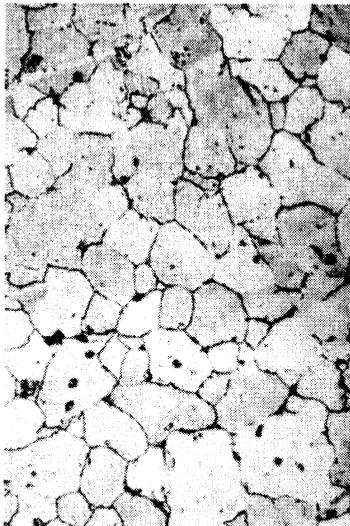
a



б



в



г



д

Рис. 1. Микроструктура стали 110Г13Л с различной концентрацией азота в литом состоянии: *a* – 0,010% N (азот не вводился); *б* – 0,035% N; *в* – 0,045; *г* – 0,065; *д* – 0,118% N. $\times 100$

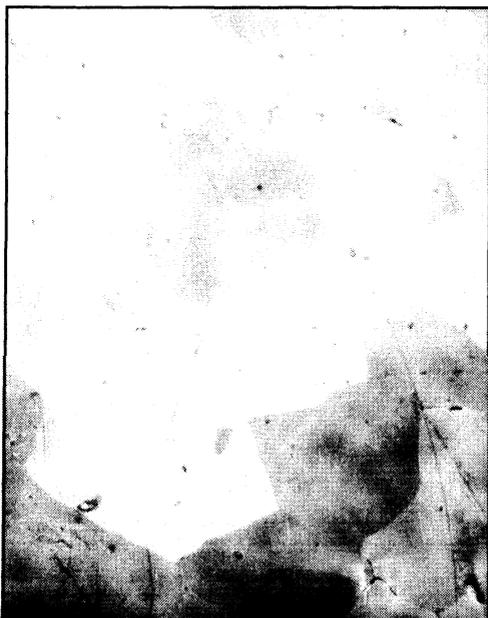


Рис. 2. Микроструктура стали 110Г13Л в закаленном состоянии. $\times 200$

Легирование стали 110Г13Л азотом приводит к заметному улучшению микроструктуры. Введение 0,035% азота (плавка 2) измельчает размер включений в стали и увеличивает их количество (см. рис. 1, *б*). Размер аустенитного зерна практически не изменяется.

Увеличение содержания азота до 0,045% (плавка 23) и 0,065% (плавка 24) приводит к дальнейшему измельчению включений и соответствующему уменьшению размеров аустенитного зерна (см. рис. 1, *в*, *г*). Структура образуется более равноосная, размер зерна соответствует 4–5-му баллу. Фазовый состав стали заметного изменения не претерпевает. Он состоит из аустенита, карбидов и феррита.

Введение 0,118% азота (плавка 16) в сталь 110Г13Л стандартного состава ухудшает ее структуру (см. рис. 1, *д*) по сравнению с предыдущими плавками. Образуется крупнозернистый аустенит (2-й балл) с грубыми выделениями карбидов и феррита в основном по границам. Следует отме-

Таблица 1. Химический состав опытных плавков аустенитной высокомарганцевистой стали

Номер плавки	Содержание элементов, мас.%					
	C	Mn	Si	S	P	N
2	1,07	13,02	0,93	0,018	0,068	0,010
3	1,12	12,85	0,85	0,012	0,052	0,035
23	1,15	12,90	0,90	0,010	0,045	0,045
24	1,08	13,04	0,86	0,011	0,053	0,065
25	1,10	12,99	0,88	0,011	0,060	0,082
16	1,11	13,00	0,85	0,012	0,056	0,118

тить, что, несмотря на высокое содержание азота, пор и газовых раковин в металле не обнаружено.

После термообработки структура сталей опытных плавков (рис. 3) с различным содер-

жением азота однофазная аустенитная и отличается только размером зерна. В исходном состоянии и при 0,118% азота она несколько крупнее.



Рис. 3. Микроструктура стали 110Г13Л с различной концентрацией азота после закалки от 1100 °С: а – 0,01% N (азот не вводился); б – 0,065% N; в – 0,118% N. х320

Легирование азотом приводит к значительно-му повышению прочностных характеристик стали (рис. 4). Наиболее высокие значения пластичности получены при 0,065% азота (относительное удлинение δ составляет 26%, относительное сужение ψ – 28%), в то время же время в исходной плавке (плавка 2) эти характеристики заметно ниже (δ составляет 22%, ψ – 23%). Дальнейшее увеличение концентрации азота до 0,118% приводит к падению значений δ и ψ и эти показатели находятся на уровне или даже ниже соответствующих значений сталей, в которые азот не вводился. С увеличением концентрации азота до 0,065% ударная вязкость КСУ возрастает от 2,0 МДж/м² (в нелегированной азотом стали) до 2,35 МДж/м². Твердость легированных азотом сталей выше, чем в исходной плавке (рис. 4).

Свойства литой высокомарганцевистой стали во многом определяются не только структурой, но и фазовым составом. Известно [5], что азот, заменяя углерод в карбидах, способствует перераспределению легирующих элементов между фазами. Он может находиться как в твердом растворе, так и в виде нитридов (карбонитридов).

Для более глубокого исследования механизма влияния азота на свойства износостойкой аустенитной стали изучают ее фазовый состав. Проводили электрохимическое выделение карбидного осадка. Электролит с растворенными в нем элементами подвергали химическому анализу, а карбидный (карбонитридный) осадок химическому, рентгенофазовому и электронно-микроскопическому исследованиям.

Количество карбидной (карбонитридной) фазы в литой и закаленной стали зависит от содержания легирующих элементов. С повышением концентрации азота увеличивается массовое содержание карбонитридного осадка в литой и закаленной стали (табл. 2).

В легированной азотом стали 110Г13Л отмечается некоторое увеличение содержания марганца в карбидном осадке как в литом, так и термически обработанном состоянии (табл. 3). Содержание углерода в анодном осадке не определялось, так как углерод в виде ионов не переходит в электролит в процессе электролиза и весь независимо от его состояния изолируется в анодном осадке. При повышении общего содержания азота в стали

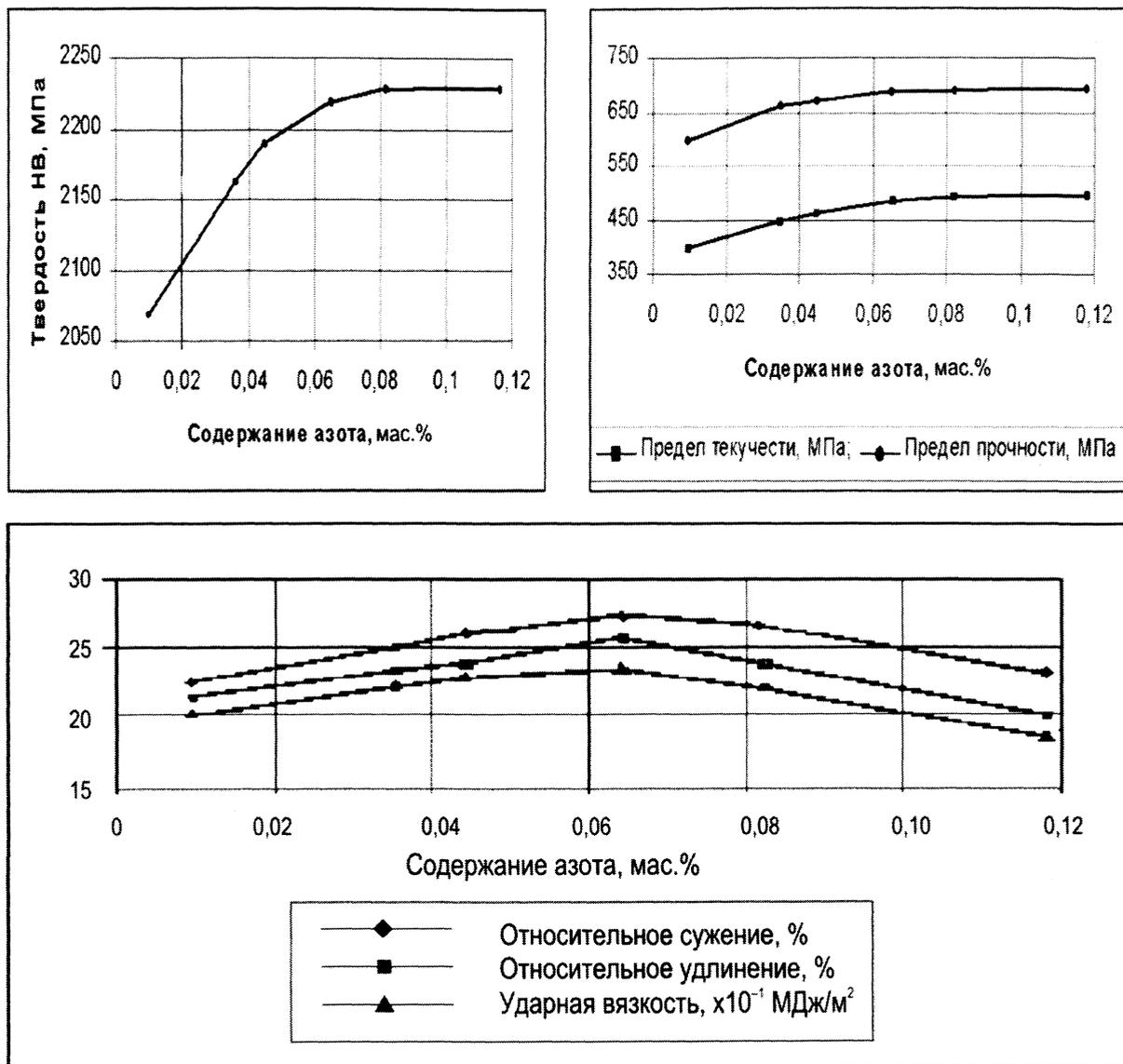


Рис. 4. Влияние азота на механические свойства стали 110Г13Л

Таблица 2. Количество карбидной фазы в аустенитной высокомарганцевистой стали

Содержание азота, мас. %	Количество карбидной фазы, мас. %	
	литое состояние	после закалки
0,010	2,3	1,8
0,025	3,6	2,1
0,065	6,3	2,3
0,080	8,5	2,5
0,118	12,9	2,8

отмечается значительный рост его концентрации в карбидном (карбонитридном) осадке. Необходимо отметить, что при 0,065% азота в стали около 12% для литого и около 8% для закаленного состояний от общей концентрации находится в химически связанном состоянии.

Важной характеристикой качества отливок является ее плотность. Исследования [6] позволили установить связь между плотностью и величиной износа, причем с увеличением плотности при всех остальных одинаковых условиях растет и

износостойкость стали. В работе [7] показано, что при повышенной плотности металла значительно полнее протекают диффузионные процессы растворения карбидов при нагреве отливки под закалку и углерод более равномерно распределяется по всему объему зерна. В этом случае значительно возрастает степень упрочнения стали при ударных и истирающих нагрузках. Высокая степень упрочнения или повышенная твердость рабочей поверхности отливки определяет способность ее сопротивляться износу. Увеличение плот-

Таблица 3. Химический состав анодного осадка (карбонитридной фазы) аустенитной высокомарганцевистой стали

Содержание азота в стали, мас.%	Содержание легирующих элементов в анодном осадке, мас.%			
	Mn		N	
	литое состояние	после закалки	литое состояние	после закалки
0,010	5,22	5,12	–	–
0,025	5,44	5,32	0,022	0,032
0,065	5,72	5,88	0,123	0,225
0,080	6,08	6,16	0,434	0,732
0,118	6,48	6,78	0,521	1,468

ности стали сопровождается повышением ее пластических свойств и ударной вязкости [6].

Плотность стали рассчитывали по известной методике [6] гидростатическим взвешиванием ударных образцов на воздухе и в этиловом спирте:

$$\rho_m = \frac{B_b(\rho_c - \lambda)}{B_b - (B_c^{(E)} - b_c)} + \lambda,$$

где B_b – масса образца на воздухе; $B_c^{(E)}$ – масса образца с подвеской в спирте; b_c – масса подвески в спирте при том же уровне погружения; ρ_c – плотность спирта; λ – плотность воздуха.

Плотность нелегированной азотом стали составляет 7,645 кг/см³. Увеличение содержания азота до 0,065% приводит к повышению ее до 7,692 кг/см³ (рис. 5). Это связано с уменьшением общей газонасыщенности, в частности по кислороду и азоту, снижением загрязненности стали неметаллическими включениями и улучшением макроструктуры. При дальнейшем повышении концентрации азота в стали до 0,118% отмечается понижение плотности. Это связано со значительным увеличением количества неметаллических включений (см. табл. 2), ухудшением макро- и микроструктуры и выделением значительного количества карбидов и феррита по границам зерен (см. рис. 1).

Склонность марганцевистой стали при деформации к упрочнению определяет ее повышенную износостойкость в определенных эксплуатационных условиях. Испытания на ударно-абразивный износ проводили в шаровой мельнице,

состоящей из двух барабанов, закрепленных на одной оси (рис. 6). Оси барабанов расположены под углом 45° относительно оси мельницы, на которой они закреплены. При вращении барабанов происходит перемещение загруженной массы вверх и при их определенном положении все содержимое загрузки падает вниз. Одновременно наклон осей барабанов заставляет содержимое барабанов совершать возвратно-поступательное движение вдоль оси барабанов. Мельница совершает 33 об/мин. В каждый барабан загружается 10 кг стальных шаров (HRC 50) диаметром 50 мм, 6 кг щебня гранитного с размерами в поперечнике 10–20 мм и испытываемые образцы размером 10x10x25 мм.

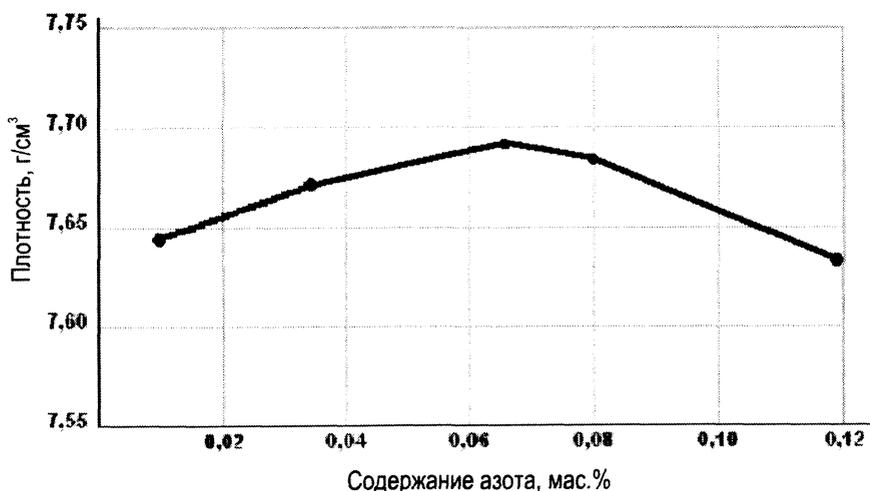


Рис. 5. Изменение плотности стали

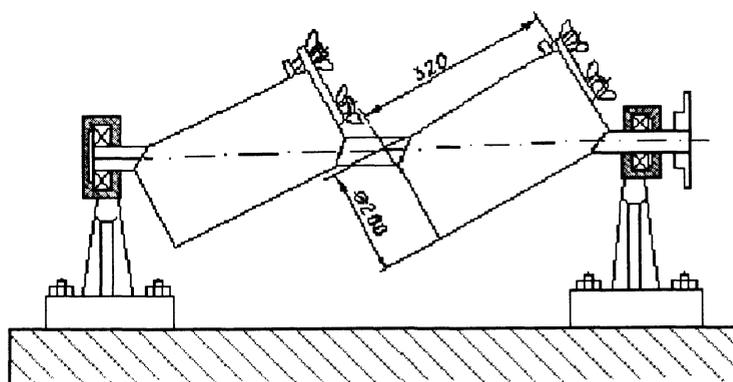


Рис. 6. Схема установки для испытаний на ударно-абразивный износ

В одном барабане проводили испытания на сухой, во втором – на влажный износ. При испытании на влажный износ в барабан дополнительно добавляли воду, причем масса ее составляла 10% от массы щебня. Известно, что с увеличением массы образца уменьшается его удельная поверхность и, следовательно, уменьшается его износ. Для уменьшения влияния этого фактора использовали только результаты испытаний на износ образцов, отличающихся по массе на $\pm 6\%$.

Износостойкость сталей оценивали по величине относительного износа. За эталон принят зака-

ленный образец стали 110Г13Л плавки №2 (см. табл. 1). Износ данного образца был принят за 100%. Износостойкость других образцов рассчитывали по отношению к эталонному.

Введение азота способствует заметному повышению износостойкости аустенитной высокомарганцевистой стали (табл. 4), причем такая зависимость характерна как для сухого, так и влажного видов износа. Наиболее высокие показатели получены для стали 110Г13Л с 0,065% азота. Дальнейший рост его содержания не способствует улучшению характеристик стойкости.

Таблица 4. Результаты испытаний на ударно-абразивный износ

Номер плавки	Содержание азота, мас.%	Относительный износ, %			
		продолжительность испытаний 100 ч		продолжительность испытаний 200 ч	
		сухой износ	влажный износ	сухой износ	влажный износ
2	0,010	100	100	100	100
3	0,035	86,1	87,0	86,5	87,0
23	0,045	82,6	83,7	82,3	83,2
24	0,065	78,0	77,1	79,2	77,0
16	0,118	83,3	89,2	83,2	85,3

Анализ полученных результатов показывает, что легирование стали 110Г13Л стандартного состава азотом приводит к уменьшению размеров аустенитного зерна (при 0,065% азота зерно соответствует 4–5-му баллу) и измельчению включений (см. рис. 1, з). Азот в данном случае является поверхностно-активным элементом и модифицирующее влияние его заключается в непосредственном торможении роста частиц твердой фазы, так как при растворении он понижает поверхностное натяжение жидкой стали [8]. Это способствует устранению столбчатой кристаллизации и получению мелкого зерна. Повышение содержания азота приводит к росту аустенитного зерна и образованию грубых выделений карбидов и феррита по границам зерен (см. рис. 1, д), что, вероятно, способствует потере модифицирующего эффекта и приводит к повышению поверхностного натяжения [8]. Азот в этом случае выполняет роль легирующего элемента.

Повышение прочностных характеристик легированной азотом высокомарганцевистой стали связано с тем, что растворенный азот скапливается на дислокациях и препятствует их движению [9]. Одновременно определенная часть азота участвует в образовании стойких нитридов. Дислокация, движущаяся в плоскости скольжения, может либо перерезать такие частицы, либо обойти их вследствие поперечного скольжения, либо пройти между ними, выгибаясь [10].

Размер аустенитного зерна влияет на пластичность стали. Наиболее высокие значения характеристик пластичности получены для структуры с наиболее мелким зерном (плавка 24). Такая же концентрация азота (0,065%) обеспечивает полу-

чение стали с наиболее высокими значениями плотности и износостойкости, что позволяет обеспечить эффективную наклепываемость [3].

Составы разработанных сплавов и технология их выплавки защищены патентами промышленно-развитых стран [11–14]. Рассматриваемые разработки внедрены на Восточно-Казахстанском машиностроительном заводе. Экономнолегированная износостойкая сталь выплавляется в соответствии с техническими условиями ТУ 48-22-270-87.

Литература

1. Волынова Т.Ф. Высокомарганцевистые стали и сплавы. М.: Металлургия, 1988.
2. Кондратюк С.Е., Касаткин О.Г. Разрушение литой марганцевистой стали. Киев: Наукова думка, 1987.
3. Власов В.И., Комолова Е.Ф. Литая высокомарганцевистая сталь Г13Л. Свойства и производство. М.: Машгиз, 1963.
4. Шульте Ю.А. Электрометаллургия стального литья. М.: Металлургия, 1970.
5. Шульте Ю.А. Неметаллические включения в электростали. М.: Металлургия, 1964.
6. Повышение качества отливок из стали Г13Л / Под ред. И.Р.Крзнина. М.: Изд-во машиностр. лит., 1963.
7. Ладыженский Б.Н., Каракула М.В. Влияние плотности марганцевистой стали на ее свойства // Организация процессов литейного производства. М.: ЦТЭИН, 1961. Вып. 15. С. 29–36.
8. Крещановский Н.С., Сидоренко М.Ф. Модифицирование стали. М.: Металлургия, 1970.
9. Аверин В.В., Ревякин А.В., Федорченко В.И. и др. Азот в металлах. М.: Металлургия, 1976.
10. Гольдштейн М.И., Фарбер В.М. Дисперсионное упрочнение стали. М.: Металлургия, 1979.
11. Пат. США, 1990. № 4923675.
12. Пат. Великобритании. 1990. № 2189508.
13. Пат. Италии. 1986. №1188555.
14. Пат. США. 1989. № 4855105.