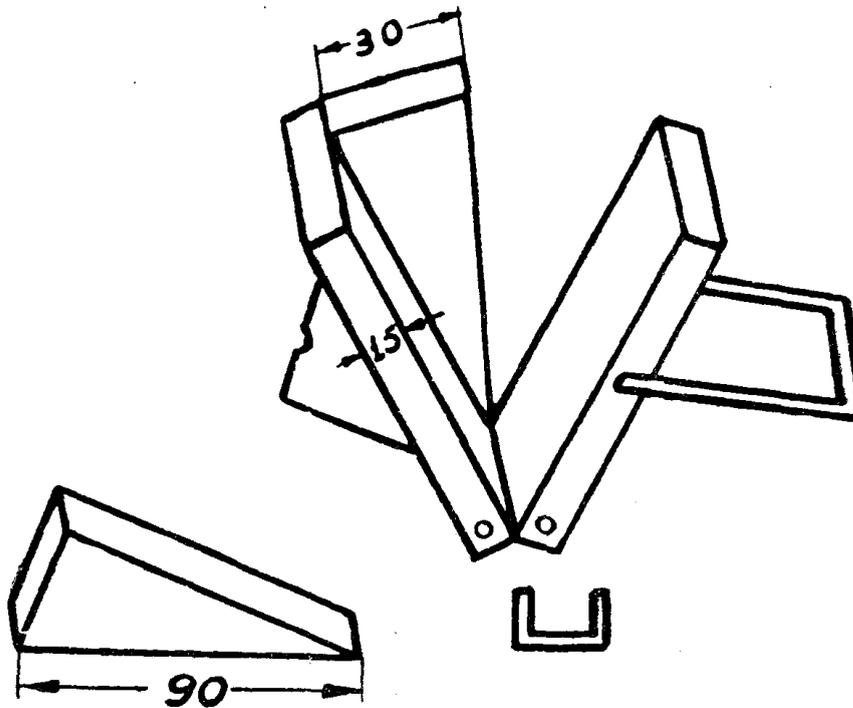


Таблица 1

№ плавков	Химический состав в %		
	С	Cr	В
5	1,42	4,47	нет
5 _B	1,42	4,47	0,06
5 _{BВ}	1,42	4,47	0,08
6	1,26	3,95	0,014
6 _B	1,26	3,95	0,003
7	1,40	4,06	нет
7 _B	1,40	4,06	0,004
8	1,20	3,20	нет
8 _B	1,20	3,20	0,007
11	1,30	2,52	0,002
11 _B	1,30	2,52	0,006
12	1,25	1,97	нет
12 _B	1,25	1,97	0,006
13	1,19	1,60	нет
13 _B	1,19	1,60	0,005
14	1,38	4,16	нет
14 _B	1,38	4,16	0,013
15	1,40	2,76	0,006
15 _B	1,40	2,76	0,007
16 _B	1,30	3,80	0,008



Фиг. 2

Фиг. 1

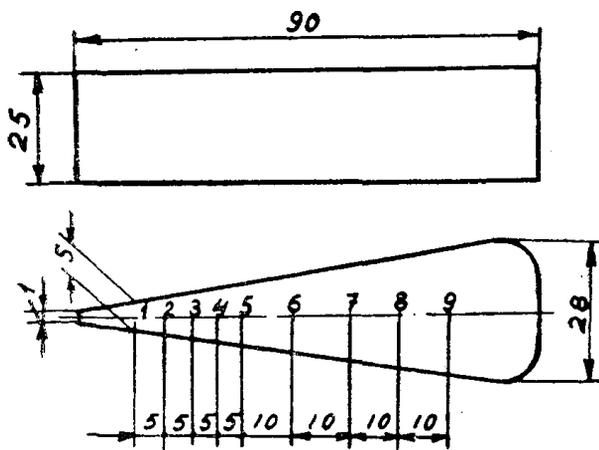
Прокаливаемость

Известно, что под влиянием модифицирования происходят значительные изменения прокаливаемости малолегированной ковальной стали. Прокаливаемость ковальной стали под влиянием модифицирования улучшается до определенной (оптимальной) добавки модификатора и снова ухудшается при дальнейшем увеличении количества модификатора. Прокаливаемость стали с до-

бавкой чрезмерно большого количества модификатора может быть хуже прокаливаемости стали без добавки. Улучшение прокаливаемости модифицированной стали объясняется с точки зрения адсорбционной теории модифицирования тем, что модификатор является поверхностно-активным по отношению к γ — твердому раствору (аустениту). Поверхностно-активные частицы модификатора могут адсорбироваться поверхностью зерен аустенита (удерживаться на поверхности зерен молекулярно-силовым полем поверхностных атомов), в результате чего уменьшается поверхностная энергия зерен.

Уменьшение поверхностной энергии зерен приводит к большей термодинамической устойчивости аустенита, в результате чего распад аустенита при охлаждении начинается позже, чем обычно. Модифицирование улучшает прокаливаемость стали только при введении очень небольших количеств модификатора, необходимых для образования на поверхности зерен одноатомной или близкой к тому адсорбционной пленки из поверхностно-активных частиц (атомов) модификатора к моменту окончания нагрева стали под закалку. При добавке больших количеств модификатора наступает так называемое „перемодифицирование“, т. е. ухудшение прокаливаемости стали вместо ее улучшения. Повидимому, при повышенной концентрации модификатора создаются условия для перехода поверхностно-активных частиц в твердый раствор, когда атомы модификатора входят в решетку γ — твердого раствора.

Возможно, что при повышенной концентрации поверхностно-активные частицы образуют самостоятельную кристаллическую решетку. И в том и в другом случае атомы модификатора удерживаются в решетке более прочными силами связи и не могут уже быть поверхностно-активными, т. е. распределяться на поверхности зерен и уменьшать их поверхностную энергию. Образование же кристаллической решетки модификатора или химических соединений модификатора с элементами, входящими в состав стали, может увеличить количество инокуляторов (центров кристаллизации перлита), поэтому прокаливаемость стали с чрезмерно большой концентрацией модификатора может даже ухудшиться по сравнению с прокаливаемостью немодифицированной стали. В технической литературе имеется большое количество



Фиг. 3

работ по исследованию влияния бора на прокаливаемость стали в ковном состоянии. На основании целого ряда исследований можно считать установленным, что оптимальное содержание бора в стали, повышающее прокаливаемость ковальной стали, равно 0,0025 — 0,003%. В то же время о влиянии бора на прокаливаемость литой стали, не подвергавшейся ковке и нагреву под закалку, почти совершенно нет никаких данных. Между тем по изменению прокаливаемости литой стали, не подвергавшейся

нагреву под закалку, можно судить о влиянии модифицирования на ход первичной кристаллизации. Именно с этой целью и было проведено исследование влияния модифицирования бором на прокаливаемость литой стали.

Изменение прокаливаемости определялось по изменению твердости R_c по сечению клина модифицированной и немодифицированной отливки. Твердость измерялась по оси клина в точках 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 (фиг. 3). Так как модифицированные и немодифицированные отливки в местах измерения твердости охлаждались с одинаковой скоростью, то измене-

ние твердости в однозначных точках модифицированного и немодифицированного клина можно объяснить только изменением прокаливаемости под влиянием модифицирования.

Таблица 2

Твердость по сечению клиньев

сечение \ № плавки	№ плавки													
	5	5 _{ВВ}	6	6 _В	7	7 _В	8	8 _В	11	11 _В	12	12 _В	13	13 _В
1	35	44	—	34,5	34	41	42	44	54	55	55	56	46	55
2	47	55	54	42	51	53	48	48,5	53	56,5	52	54	51	51
3	59	59	58	45	54	58	54,5	52	52	54,5	51	53	47,5	52
4	57	57	56,5	52	54	56	58	55	52	53,5	51	52	47	52
5	56	55	—	53,5	55	55	55	57	52	52,5	51	51	47	51
6	54	51	53	55	53,5	52	51,5	56	49	50,5	49	50	46,5	48
7	52	49	51	56,5	52	50	49	54	49	49,5	50	49	44	47
8	51	48	50	57	51	50,5	47,5	52	43	49	48	48	42,5	—
9	51	—	49	55	—	—	43	—	—	—	—	—	—	—

В таблице 2 приведены результаты измерения твердости клиньев в литом неотпущенном состоянии в различных точках. Результаты измерения твердости показывают, что заметное улучшение прокаливаемости наблюдается только в плавке № 6_В с добавкой 0,003% бора. Прокаливаемость этой плавки выше прокаливаемости плавки № 5 без бора, несмотря на то, что в плавке № 5 больше углерода и хрома. Твердость в первых точках плавки № 6_В ниже твердости в соответствующих точках плавки № 5, что свидетельствует о большей устойчивости остаточного аустенита в плавке № 6_В по сравнению с плавкой № 5. Большое количество остаточного аустенита в плавке № 6_В сохраняется до восьмой точки, так как твердость до этой точки непрерывно повышается. В плавке № 5 значительные количества остаточного аустенита сохраняются только до третьей точки, после которой начинается непрерывное понижение твердости. Этот вывод подтверждается тем, что клин плавки № 6_В в первых точках гораздо слабее притягивается магнитом, чем в соответствующих точках клина плавки № 5.

Во всех остальных модифицированных плавках прокаливаемость заметно не изменяется, а в первых точках даже ухудшается, что особенно заметно в плавке № 6 с добавкой 0,014% бора.

Можно сделать вывод—бор наиболее заметно улучшает прокаливаемость литой малолегированной стали при введении его в тех же количествах (0,003%), при которых наблюдается наиболее заметное улучшение прокаливаемости малолегированной стали, подвергающейся ковке и нагреву под закалку. Если бы влияние бора на свойства литой стали объяснялось только уменьшением поверхностной энергии зерен аустенита и увеличением устойчивости аустенита, то такое совпадение оптимального количества бора, добавляемого в литую и кованую сталь, можно было бы объяснить одинаковой величиной адсорбирующей поверхности (одинаковой степенью дисперсности) как к моменту окончания нагрева кованой стали под закалку, так и к моменту окончания кристаллизации литой стали при данной скорости охлаждения. Однако из адсорбционной теории модифицирования следует, что модифицирование, кроме изменения прокаливаемости, должно вызывать изменение в распределении легирующих элементов между фазами сложного сплава. Это изменение связано с неравномерной адсорбцией поверхностно-активных частиц зародышами кристаллизации отдельных фаз, вследствие чего также неравно-

мерно изменяется поверхностная энергия зародышей и их устойчивость. Поэтому возможно увеличение количества одной фазы за счет другой.

Изменение в составе фаз должно происходить при кристаллизации из расплавленного состояния, так как оно связано с изменением количества центров кристаллизации отдельных фаз вследствие неравномерного изменения поверхностной энергии центров кристаллизации и их устойчивости под влиянием модифицирования.

Наибольшее изменение в составе фаз должно происходить при ускоренном охлаждении, так как с увеличением степени дисперсности возрастает роль поверхностной энергии при образовании зародышей кристаллизации.

Повидимому, чем сложнее сплав, тем должно быть более заметно изменение состава фаз под влиянием модифицирования.

При нагреве модифицированного сплава (при ковке и закалке) это изменение в составе фаз может частично или полностью исчезнуть.

Изменение в составе аустенита литой стали под влиянием модифицирования может, в свою очередь, вызвать изменение прокаливаемости стали.

Таким образом, прокаливаемость литой стали, в отличие от прокаливаемости ковальной стали, зависит от двух факторов:

1. Изменения устойчивости аустенита в результате уменьшения поверхностной энергии зерен аустенита под влиянием адсорбции модификатора.

2. Изменения устойчивости аустенита в результате изменения его состава.

В исследуемой стали должно происходить изменение состава фаз, хотя и менее значительное, чем в сталях, более сложных по химическому составу, поэтому изменение прокаливаемости стали с добавкой 0,003% бора следует объяснять суммарным действием вышеуказанных двух факторов.

Необходимо отметить, что, как это следует из сравнения изменения прокаливаемости плавов № 6в и 5, прокаливаемость в разных точках, охлаждающихся с различной скоростью, изменяется неодинаково.

Наибольшее изменение прокаливаемости наблюдается в точке 3. Неодинаковое изменение прокаливаемости под влиянием модифицирования в местах клина, охлаждающихся с разной скоростью, показывает, что влияние модификатора зависит от скорости охлаждения отливки. Эту зависимость можно объяснить только тем, что при различной скорости охлаждения возникает различное число центров кристаллизации, следовательно, изменяется величина зерна и общая величина поверхности, адсорбирующей поверхностно-активные частицы модификатора. Так как величина адсорбирующей поверхности при разной скорости охлаждения не может быть одинакова, то не может быть одинакова и степень насыщения поверхности поверхностно-активными частицами при одном и том же количестве модификатора.

Следовательно, не может быть одинаковым и влияние одного и того же количества модификатора на прокаливаемость отливок, охлаждающихся с разной скоростью.

О величине зерна в плавках

В плавках № 5, 6, 7, 8 и 11 определялось влияние бора на величину зерна. Данных о величине зерна первичной кристаллизации в литературе очень мало. Известно, что бор уменьшает величину зерна первичной кристаллизации. Есть много литературных работ по изучению влияния бора на величину зерна ковальной стали. Установлено, что малые добавки бора способствуют уменьшению фактического зерна аустенита. Известно также, что зерно в стали с добавкой бора растет неравномерно. Величина зерна, полученная путем длительной выдержки при высоких температурах, больше в стали с бором, нежели в немодифицированных сталях. Это позволяет предположить, что в каком-то промежутке времени при постоянной температуре зерно модифицированной стали растет ускоренно.

Поэтому более мелкое зерно модифицированной стали (при малых выдержках при $T = 925^\circ$) вырастает до большей величины по сравнению с немодифицированной сталью, при больших выдержках.

В работе за величину зерна литой стали принимали промежутки между светлой сеткой, полученной на шлифе при травлении азотной кислотой. Светлая сетка может быть сеткой карбидной эвтектики или твердым раствором, более богатым хромом и углеродом. Величина зерна определялась по микрофотографиям, полученным при увеличении 200. Структура фотографировалась во всех клиньях в одной и той же точке (точка 1, фиг. 3). Наиболее мелкое зерно в плавках:

№ 11 с содержанием 0,002% бора,

№ 6 с содержанием 0,003% бора,

№ 7 с содержанием 0,004% бора.

По сравнению с немодифицированными в этих плавках величина зерна уменьшается в 2—3 раза. В плавках без бора (плавка № 8) и в плавках с большим, чем 0,004% содержанием бора (плавка № 5, 6в, 11в), зерно крупнее.

Вывод: оптимальная добавка, наиболее сильно влияющая на измельчение микроструктуры литой стали, — в пределах 0,002 + 0,004% бора.

Микроструктура плавков

При исследовании микроструктуры плавки были разбиты на 2 группы. К I группе отнесены плавки № 5, 5в, 5вв, 6, 6в, 7, 7в (табл. 1) с содержанием хрома в пределах 3,95—4,47%, углерода—1,26—1,42%. Ко II группе относятся плавки, менее легированные хромом и с меньшим содержанием углерода—плавки № 8, 8в, 11, 11в, 12, 12в, 13, 13в, 14, 14в, 15, 15в, 16в (табл. 1).

Структура исследовалась в точке А, В, С, Д плавков (фиг. 4).

Микроструктура в плавках первой группы без модификатора (плавки № 5, 7).

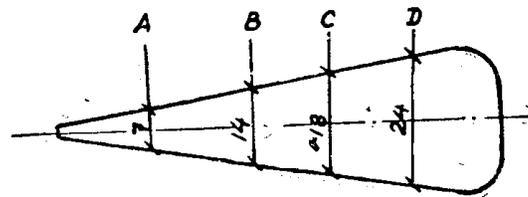
Точка А состоит из трех структурных составляющих: светлой составляющей, игл мартенсита, светлой сетки, которую можно считать сеткой первичных карбидов, или сеткой из обогащенного углеродом и хромом твердого раствора.

В точке В светлая составляющая (аустенит), темная составляющая (продукты распада аустенита), затем иглы мартенсита и отдельные обрывки сетки типичных первичных ледебуритных карбидов,

В точке С только две структурные составляющие: темная (продукты распада аустенита) и сетка первичных карбидов.

Микроструктура в плавках первой группы модифицированных (плавки 5а, 5вв, 6, 6в, 7в).

Введение бора, особенно оптимальная добавка, приводит к увеличению количества светлой составляющей (аустенита) и к относительному уменьшению темной составляющей (продукты распада аустенита). Из литературных данных известно, что бор делает аустенит более устойчивым. Изменение количества карбидной фазы установить по микроструктуре было трудно.



Фиг. 4

Микротвердость

Микротвердость отдельных структурных составляющих определялась на приборе ПМТ-3. Главным образом определялась микротвердость светлой

составляющей (светлая составляющая по нашим предположениям—высоколегированный аустенит). При определении микротвердости светлой составляющей нагрузка на алмазную пирамиду 20 г. Отпечатки измерялись при увеличении 487. В табл. 3 приведены значения микротвердости светлой составляющей, измеренной в одном и том же сечении клина у всех плавков (точка А, фиг. 4).

Таблица 3

Микротвердость светлой составляющей, кг/мм²

№ плавков	5	5 _в	5 _{вв}	6	6 _в	7	7 _в
Содержание бора %	0	0,060	0,080	0,014	0,003	0	0,004
Микротвердость	495	483	500	504	423	511	450

Значения (данные) микротвердости сопоставлялись в плавках, близких по химическому составу (плавки № 5, 5_в, 5_{вв}, 6, 6_в, 7, 7_в).

Установлено, что модифицирование бором приводит к снижению микротвердости светлой составляющей. Особенно заметное снижение микротвердости наблюдается в плавке с 0,003% бора (плавка № 6_в), следовательно, наибольшее изменение в составе фаз литой стали вызывается добавкой 0,003% бора, так как изменение (уменьшение) микротвердости светлой составляющей можно объяснить только изменением химического состава светлой составляющей.

Добавка 0,003% бора одновременно с наиболее заметным изменением прокаливаемости наиболее сильно влияет на микроструктуру (величина зерна) и изменение состава фаз.

Следует отметить, что в более сложных сплавах оптимальное количество модификатора, наиболее заметно изменяющее состав фаз и величину зерна, может не совпадать с оптимальным количеством модификатора, наиболее заметно изменяющим прокаливаемость.

Как уже отмечалось, это связано с тем, что на прокаливаемость модифицированной стали влияют два фактора—уменьшение поверхностной энергии зерен аустенита в результате адсорбции поверхностно-активного модификатора и изменение химического состава аустенита.

Выводы

1. Модифицирование бором приводит к изменению прокаливаемости, микроструктуры и величины зерна литой стали.
2. Под влиянием модифицирования происходит изменение в составе фаз литой стали.
3. Влияние модификатора и оптимальная его добавка зависят от скорости охлаждения отливки.