

**К ВОПРОСУ О ПРОКАЛИВАЕМОСТИ И ЕЕ МЕХАНИЗМЕ
В СТАЛЯХ С БОРОМ**

А. И. ФАЛЬКОВ

(Представлено профессором доктором А. Н. Добровидовым)

В специальной литературе уделено большое внимание вопросам прокаливаемости и ее механизма в сталях с бором. Однако несмотря на многочисленность исследований, особенно с доэвтектоидными сталями, единого мнения по этому вопросу еще не установлено.

Об исследованиях сталей с бором за границей можно отметить, что они ведутся в большом объеме.

В работе Лика [1], в которой автор, излагая свои взгляды, дает обобщенный материал известных исследователей, указывается, что главное значение бора в сталях—это его влияние на прокаливаемость и что это влияние на повышение устойчивости аустенита отличается от обычно применяемых легирующих элементов. Однако, как указывает далее Лик, „... Механизм этого еще не понят..., и что в опубликованных данных предложено немало умозрительного“.

В отечественной литературе мы также находим немало различных и даже противоречивых взглядов: в вопросах о том, образует ли бор твердый раствор замещения или внедрения, какова растворимость бора в α и γ железе и др. Что касается вопроса о механизме прокаливаемости сталей с добавками бора, то противоречивость в объяснении его наиболее резко выражена в работах С. М. Винарова [2] и В. И. Архрова [3].

Представление С. М. Винарова [2,4] о замедлении кинетики распада аустенита под влиянием малых добавок бора базируется на явлениях адсорбции. Согласно этому представлению образование на границах зерен моноатомного слоя адсорбированного вещества—бора приводит к снижению поверхностной энергии, что и вызывает повышение устойчивости аустенита.

В. И. Архаровым показано [3,5], что вывод об увеличении прокаливаемости стали в связи с уменьшением только поверхностной энергии под влиянием малых добавок бора является ошибочным: при снижении поверхностной энергии уменьшается критический размер зародыша, т. е. облегчается зарождение устойчивых центров кристаллизации новой фазы, и в этом случае прокаливаемость стала должна уменьшаться.

Не отрицая того, что малые примеси бора снижают поверхностную энергию, В. И. Архаров указывает, что для увеличения прокаливаемости стали примеси бора, наряду со снижением поверхностной энергии, должны снижать и количество высвобождающейся при пере-

группировке атомов объемной свободной энергии ($E_{\gamma} - E_{\alpha}$), за счет которой совершается работа по образованию поверхности раздела зародыша с материнской фазой.

Если привлечь к обсуждаемому вопросу ряд других литературных данных, то это позволит составить о механизме прокаливаемости представление, которое подтверждает точку зрения В. И. Архарова и, более того, дает возможность объяснить, почему примеси бора должны снизить количество высвобождающейся объемной свободной энергии ($E_{\gamma} - E_{\alpha}$) при перегруппировке атомов.

Отметим, прежде всего, что большинство исследований сходится в одном вопросе, а именно: в предпочтительном размещении бора на границах зерен или точнее—в межкристаллитных переходных зонах [1, 4, 5, 7]. Отчетливо также выявлено, что в смысле благотворного влияния на прокаливаемость бор наиболее эффективен в малоуглеродистых сталях. Поэтому возникло представление, что бор препятствует образованию зародышей феррита и не оказывает заметного задерживающего влияния на зарождение цементита высокоуглеродистых сталей.

Другим опирающимся на экспериментальные данные общим выводом является то, что добавки бора ведут к снижению температуры плавления и температуры перегрева сталей.

К. М. Гельфанд и З. М. Гомольская [6], исследуя сталь У10 с содержанием бора от 0,21 до 1,3 %, нашли, что линия ES под влиянием добавок бора сильно смещается влево и, например, при содержании 0,5 % бора оплавление зерен наступает при температуре 1200° .

В нашем исследовании о влиянии бора на свойства стали ШХ15 нагревом с интервалом 20° в пределах $950-1250^{\circ}$ выявлено, что оплавление зерен наступает при 1140° при добавках бора более 0,05 % (по синтезу). Подобные же явления установлены исследованиями Филда [11] в отношении перегрева стали, причем с весьма малыми добавками бора. Филд нашел, что при 0,003 % бора температура перегрева конструкционной стали понижается с 1232 до 1204° .

Как увидим далее, явления, связанные со снижением температуры перегрева и температуры оплавления зерен в стали с бором, имеют общее происхождение. Поэтому механизм прокаливаемости в сталях с бором можно понять, если, кроме указанных ранее общих точек зрения о преимущественном размещении бора в пограничных зонах зерен и о тормозящем влиянии бора на зарождение зародышей феррита, учесть еще и способность добавок бора снижать температуру плавления и перегрева металла.

Известно [8], что по своему строению межкристаллитные зоны представляют собой участки зерен с искаженной решеткой на глубину от нескольких сотен до десятков тысяч атомных слоев в зависимости от того, насколько разнятся между собой решетки и главные кристаллографические направления смежных зерен. Искаженным кристаллическим решеткам межкристаллитных прослоек сопутствует напряженное состояние. Искращения являются концентраторами напряжений, и в энергетическом смысле эти места являются менее устойчивыми, чем само зерно. Естественно, что упорядочение, хотя бы и частичное, решетки межкристаллитной прослойки, приводя к устранению искажений и уменьшению напряженного состояния, повысит устойчивость этой зоны, т. е. образование зародышей феррита будет затруднено.

При упорядочении решетки в межкристаллитных прослойках идет тот же процесс и действуют те же движущие силы, которые проявляются при отдыхе наклепанного металла.

В. Д. Кузнецов [9] отмечает: „... если представлять себе отдых как результат обмена атомов местами в искаженных участках решетки, приводящего к уничтожению этих искажений, то ясно, что для возможности обмена местами атомы должны обладать кинетической энергией, по крайней мере, равной высоте потенциального барьера, отделяющего один атом от другого в кристаллической решетке“.

Далее В. Д. Кузнецов говорит, что для обмена местами с соседом атом должен совершить определенную работу, преодолевающую силы взаимодействия решетки. В свою очередь, силы взаимодействия решетки зависят от ее строения и от строения входящих в эту решетку элементов (молекул, атомов, ионов). Вместе взятые эти факторы определяют в то же время температуру плавления и, следовательно, высоту потенциального барьера, величина которой находится в прямой зависимости от точки плавления.

Из этих положений В. Д. Кузнецова для нас важен вывод о том, что снижение температуры плавления металла есть результат снижения сил связи решетки и что энергия потенциального барьера атомов (ионов), величина которой находится в прямой зависимости от точки плавления, также снижается.

Если металл границ зерен по каким-то причинам приобретает еще более пониженную температуру плавления, то это означает, что уменьшается соответственно и высота потенциального барьера атомов металла приграничной переходной зоны. В таком случае логично заключить, что обмен атомов местами в искаженных участках решетки межкристаллитной прослойки и устранение искажений, являющихся концентраторами напряжений, будет протекать при температурах аустенизации активнее.

Применительно к сталям с добавками бора надо полагать, что размещение примесей бора в межкристаллитных прослойках приводит, как показывают опытные данные, к понижению точки плавления металла этих прослоек и наряду с этим к уменьшению энергии потенциального барьера атомов (ионов) металла межкристаллитной зоны.

О возможности изменения энергии связи в решетке сплавов железа под влиянием бора указывается также в работе М. Е. Блантера и Н. П. Беседина [14].

Связь между средней кинетической энергией теплового движения частиц (молекул, атомов, ионов) и абсолютной температурой устанавливается постоянной Больцмана (k). Как указывалось ранее, обмен атомов местами и упорядочение решетки осуществляется тогда, когда энергия теплового движения атомов превышает или равна энергии потенциального барьера. Это условие описывается уравнением $3kT \geq U$ (1), где T —абсолютная температура, U —энергия потенциального барьера.

Допустим, имеем два образца из стали одинакового состава с добавкой и без добавки бора. В стали без бора энергия потенциального барьера атомов металла межкристаллитной зоны равна U_1 и в стали с бором— U_2 . Из сказанного ранее можем написать, что $U_1 > U_2$. При одинаковой температуре нагрева обоих образцов $3kT - U_2 > 3kT - U_1$ (2).

Из неравенства 2 видно, что требования, вытекающие из уравнения 1, для прохождения процесса упорядочения решетки в межкристаллитных прослойках в бористой стали удовлетворяются полнее, чем в стали без бора.

На основании тех же соображений становится ясно, почему в присутствии бора, при температуре нагрева под закалку, аустенит-

ное зерно получается обычно крупнее [10, 11, 12] по сравнению с зерном аустенита в той же стали без бора.

Обратимся снова к уравнению $3kT \geq U$. Видно, что чем меньше энергия потенциального барьера (U), тем должна быть ниже температура (T), при которой процесс активности обмена мест атомами и упорядочения решетки не снижается. Это указывает, что при одинаковых температурах аустенизации в сталях с бором приграничные зоны зерен аустенита способны быстрее принимать упорядоченное строение, чем в сталях без бора, и поэтому в первом случае протекает более активный рост зерна. Этим, собственно, и объясняется снижение температуры перегрева стали с малыми добавками бора, которое обнаружено в опытах Филда.

Как видно, предложенный механизм прокаливаемости не отрицает некоторые явления, которые связаны с адсорбцией примесей бора кристаллитами. Однако объясняя причину повышенной концентрации бора в межзеренной прослойке, адсорбционная теория не раскрывает самого механизма влияния бора на прокаливаемость, если не будет учитываться при этом изменение сил связи кристаллической решетки переходной зоны.

Кстати сказать, Адэр, Спретнак и Спейсер [13] экспериментально показали на примере конструкционных сталей с содержанием бора 0,0011—0,0013 %, что присутствие указанных модифицирующих добавок бора, давших значительный эффект по прокаливаемости, привело к снижению поверхностной энергии лишь на величину от 1,9 до 3,5 % от общего уровня. Этого, как утверждают авторы, далеко не достаточно, чтобы объяснить влияние бора на прокаливаемость сталей только явлением снижения поверхностной энергии.

Выводы

1. На основании данных ряда исследований можно считать установленным, что преимущественное размещение бора в межкристаллитных прослойках вызывает снижение точки плавления этой прослойки, а также температуры перегрева стали, в том числе и при весьма малых примесях бора.

2. Снижение температуры плавления металла переходной зоны свидетельствует о снижении в этой зоне сил связи кристаллической решетки и энергии потенциального барьера атомов, поэтому при температурах аустенизации в сталях с бором следует ожидать большего упорядочения решетки переходной зоны и устранения дефектов, чем это имеет место в тех же сталях без бора.

3. Снижение энергии потенциального барьера атомов в переходной зоне зерен аустенита означает, что при перегруппировке атомов в начальной стадии кристаллизации и образования зародышей феррита уменьшается количество высвобождающейся свободной объемной энергии, необходимой для работы на образование поверхностей раздела зародыша. Этот эффект в сочетании с большей упорядоченностью кристаллической решетки переходной зоны обеспечивает повышенную устойчивость аустенита в сталях с добавкой бора.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. M. Leak, Metall treatment and Drop Forging, v. XXIII, № 124, January, 1956.
2. Винаров С. М. Журнал технической физики, т. XXII, вып. 2, 335—337, 1952.
3. Архаров В. И. Журнал технической физики, т. XXII, вып. 2, 332—335, 337—339, 1952.
4. Винаров С. М. Журнал технической физики, т. XIX, вып. 2, 1949.

5. Архаров В. И. Труды Центр. Н-И института Министерства транспортного машиностроения СССР, № 5, 25—27, 1946.
 6. Гельфанд К. М. и Гомольская З. М. Литой и наплавленный инструмент ВНИТОМАШ, Московское отделение, МАШГИЗ, 1951.
 7. Просвирин В. И., Крещановский Н. С., Гинзбург Э. С. ЦНИИТМАШ. Вопросы металловедения аустенитных сталей, МАШГИЗ, 1952.
 8. Бернштейн. Труды НТО черной металлургии, т. VI, 1955.
 9. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела, т. II, Томск, из-во „Красное Знамя“, 479, 486, 1941.
 10. Винаров С. М. ДАН СССР, 55, 9, 1947.
 11. J. Field, Metal Progress 64, № 2, 1953, 78—83.
 12. L. Rohl, Iron and Steel Instit., 176, Part. 2, 1954, 173—187.
 13. Адэр, Спретнак, Спейсер. Реферативный журнал „Физика“ № 2, 1956.
 14. Блантер М. Е. и Беседин Н. П., Металловедение и обработка металлов. 6, Машгиз, 1955, 3—10.
-