



*Influence of temperature-temporal parameters of thermal treatment on changing of structure and characteristics of carbon chrome-molybdenum steel is studied. It is shown that there are considerable areas with granular morphology of cementite in metal structure after high-temperature tempering, what provides lowering of microhardness of steel by 25%, and after medium-temperature tempering there are no essential structural changes.*

В. А. ЛУЦЕНКО, ИЧМ НАН Украины, Н. И. АНЕЛЬКИН, РУП «БМЗ»,  
Т. Н. ГОЛУБЕНКО, ИЧМ НАН Украины, В. И. ЩЕРБАКОВ, РУП «БМЗ»,  
О. В. ЛУЦЕНКО, ИЧМ НАН Украины, Л. А. ДРОБЫШЕВСКИЙ, РУП «БМЗ»

УДК 620.18:669.15'26'28–194:621.785

## ИЗМЕНЕНИЕ МОРФОЛОГИИ СТРУКТУРЫ УГЛЕРОДИСТОЙ ХРОМОМОЛИБДЕНОВОЙ СТАЛИ ПОД ВЛИЯНИЕМ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Горячекатаный сортовой прокат из конструкционных легированных сталей обычно имеет повышенные значения твердости, что может привести к значительному снижению стойкости инструмента и предельно допустимых деформаций при изготовлении деталей. Поэтому перед механической обработкой такой прокат подвергается предварительной термической обработке. Требуемая твердость сортового проката из легированных конструкционных сталей может быть обеспечена высоким отпуском при подкритических температурах 650–700 °С с длительной изотермической выдержкой или сфероидизирующим отжигом с нагревом в межкритическую область ( $A_{c1}$ – $A_{c3}$ ) с последующей выдержкой при температуре ниже  $A_{c1}$ . Последний вид обработки подходит только для сталей, содержащих более 0,5% углерода, так как полностью сфероидизированная структура приводит к сильному смягчению металла, что ухудшает его обрабатываемость резанием. Прокат из легированных сталей, содержащих до 0,5% углерода, обычно подвергается высокому отпуску, однако общая длительность такой обработки может составлять до 50 ч, так как нагрев и охлаждение проката необходимо проводить медленно. После такой обработки структура стали должна содержать пластинчатые и сфероидизированные карбидные частицы.

Для возможности сокращения длительности термической обработки были проведены исследования влияния температурно-временных параметров отпуска на структуру и свойства горячекатаного проката из конструкционной легированной стали. Исходным материалом для исследований служили образцы углеродистой хромомолибдено-

вой стали следующего химического состава, %: С – 0,39; Cr – 1,06; Mo – 0,25; Si – 0,26; Mn – 0,75; P – ≤ 0,013%; S – ≤ 0,023. Термическую обработку проводили на небольших образцах с нагревом в интервале температур 500–700 °С и выдержкой от 1 до 6 ч, охлаждение после отпуска – на воздухе и с печью.

После термической обработки исследовали микроструктуру образцов.

Исходная микроструктура (рис. 1, а) горячекатаного металла состояла из бейнита, перлита (5–10%) и феррита (до 15%). В структуре металла после среднего отпуска произошли незначительные структурные превращения в сравнении с исходным состоянием (рис. 1, б, в). Морфология цементита в перлите при максимальной выдержке 6 ч изменяется всего на 10%.

Однако в структуре перлитного участка после высокого отпуска заметно изменение морфологии цементита в результате прохождения структурных превращений: коагуляции и сфероидизации, термодинамическим стимулом которой является уменьшение свободной энергии (рис. 1, г–е).

Сфероидизация пластинчатого перлита включает в себя деление карбидных пластин на части неправильной формы и собственно сфероидизацию и дальнейшую коагуляцию карбидных частиц. Так как протекание структурных превращений при отпуске зависит от скорости диффузии атомов углерода и железа, то с повышением температуры превращения проходят в большей степени, что видно по микроструктуре стали после среднего и высокого отпуска в течение 3 ч.

На рис. 2 представлены результаты изменения микротвердости образцов углеродистой хромомо-

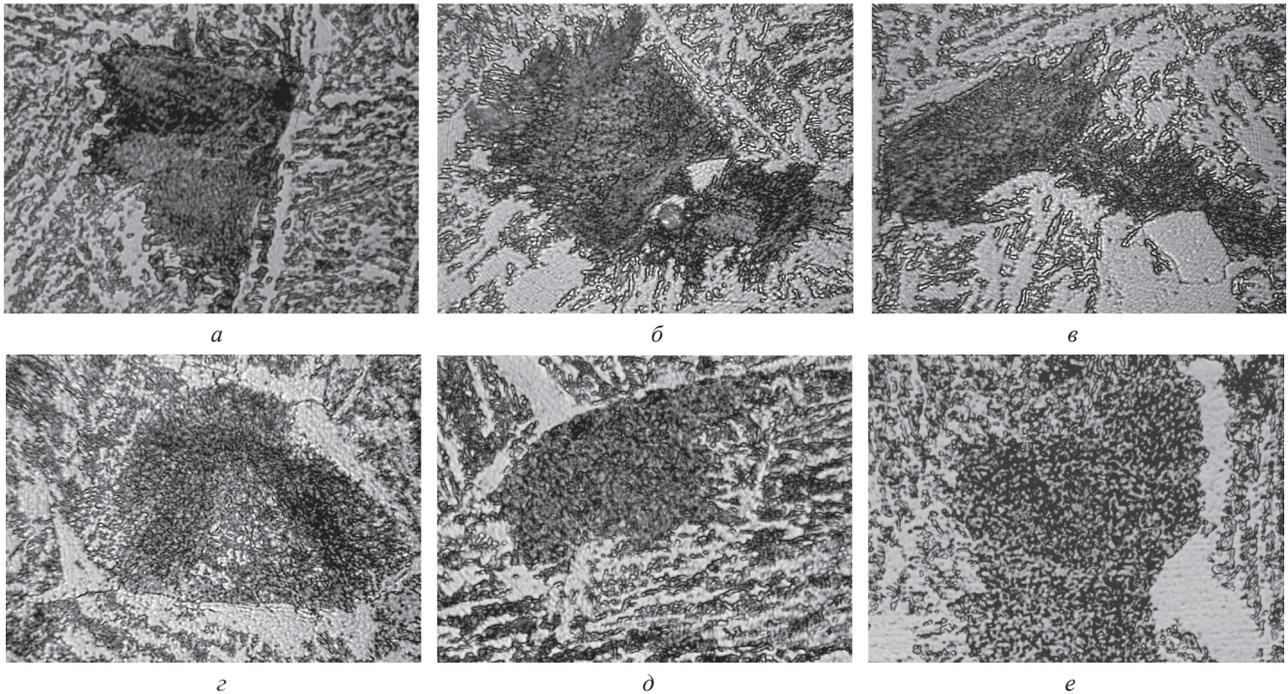


Рис. 1. Микроструктура хромомолибденовой стали: а – исходное состояние и после среднего (б, в) и высокого (z-е) отпуска с выдержкой 1 ч (z), 3 ч (б, д) и 6 ч (в, е) с последующим охлаждением на воздухе (а, б, z, д) или с печью (в, е).  $\times 800$

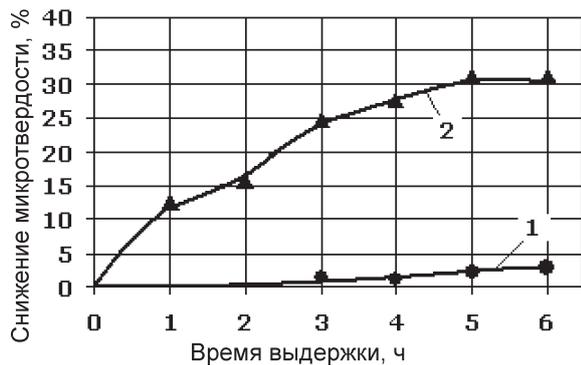


Рис. 2. Влияние длительности выдержки при среднем (1) и высоком (2) отпуске на микротвердость исследуемой стали

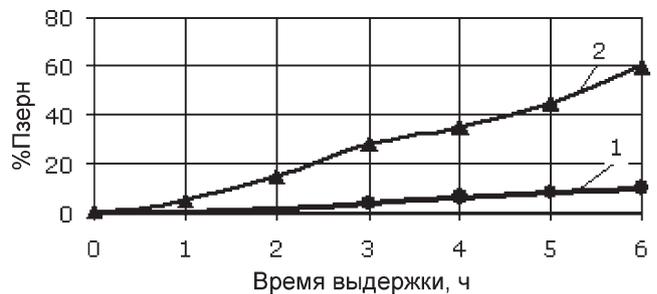


Рис. 3. Доля сфероидизированного перлита в стали после среднего (1) и высокого (2) отпуска

либденовой стали после проведенных термических обработок. Из рисунка видно, что после среднего отпуска с различными изотермическими выдержками снижение микротвердости относительно исходного состояния не наблюдается даже после выдержки 6 ч. При этом микротвердость стали, отпущенной при повышенных температурах, начинает уменьшаться при небольших выдержках и при выдержке 6 ч снижается на 32%.

Одновременно со снижением микротвердости при высоком отпуске начинает повышаться степень сфероидизации карбидов в перлите с 10% при выдержке 1 ч до 60% при выдержке 6 ч (рис. 3). После среднего отпуска максимальная сфероидизация карбидов достигает 10%.

Известно [1], что при отпуске при температуре порядка 500 °С легирующие карбидообразующие элементы могут повышать твердость металла бла-

годаря образованию высокодисперсных карбидных частиц. Также некарбидообразующие элементы (например, кремний), находясь в твердом растворе, феррите, упрочняют его, что также повышает твердость. Снижается твердость благодаря сильной обособленности (коагуляции) карбидов, которая ускоряется при температурах, близких к точке  $A_{c1}$ . Поэтому для прохождения сфероидизации и коагуляции карбидов необходимо проведение высокого отпуска.

При измерении микротвердости стали, отпущенной при температурах ниже 600 °С, было замечено, что значения микротвердости перлитных участков превышают значения микротвердости бейнитных участков на 150–330 Н/мм<sup>2</sup>. На основании этих данных можно предположить, что в более термодинамически неустойчивом бейните структурные превращения начинаются при пони-

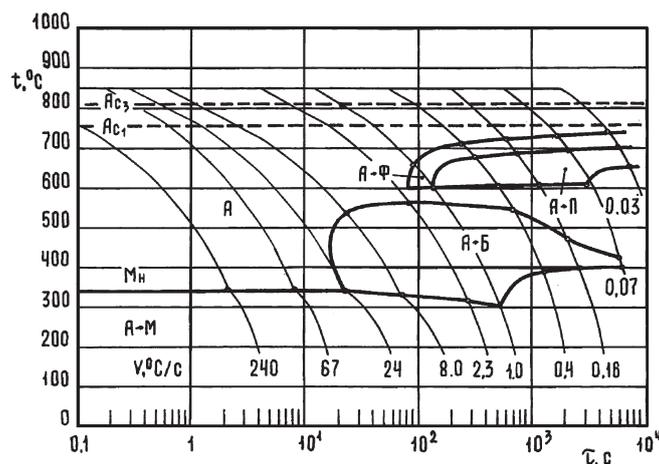


Рис. 4. Термокинетическая диаграмма качественной углеродистой стали, содержащей 0,39% С; 1,08% Сг и 0,25% Мо

женных температурах. Это подтверждает [1], что для бейнитной структуры в результате отжига при температурах около  $400\text{ }^\circ\text{C}$  наступает падение твердости, так как дисперсные карбиды в бейните легче коагулируют, чем в перлитной области. Поэтому в целях экономии энергоресурсов (снижение температур отпуска при производстве проката из углеродистой хромомолибденовой стали) после горячей прокатки желательнее обеспечивать бейнитную структуру.

Были проведены исследования [2] влияния скорости охлаждения на структурообразование в углеродистой хромомолибденовой стали с построением уточненной термокинетической диаграммы (рис. 4).

Согласно приведенной термокинетической диаграмме, преимущественно бейнитную структуру в хромомолибденовой стали можно получить при охлаждении проката в интервале скоростей  $1,0\text{--}1,7\text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ . При таких скоростях охлаждения перлит не образуется, однако возможно образование незначительной доли мартенсита, который при дальнейшей термической обработке распадется на феррит и карбиды.

На основании полученных результатов следует отметить, что средний отпуск в течение 6 ч дает худшие результаты, чем высокий отпуск в течение 1 ч. Хорошие результаты смягчения металла после высокого отпуска были достигнуты уже при выдержке в течение 3 ч, при этом микротвердость стали по сравнению с горячекатаным состоянием снижается на 25%, что соответствует образованию 30% сфероидизированного перлита. Дальнейшее увеличение изотермической выдерж-

ки не приводит к существенному понижению микротвердости. Таким образом, длительность выдержки при высоком отпуске сортового проката из легированной стали можно сократить на 40% с обеспечением необходимых свойств. Такой вид обработки планируется опробовать в колодцах замедленного охлаждения стана 850 РУП «БМЗ».

Для дальнейшего сокращения термической обработки и снижения потребления энергоресурсов путем понижения температуры отпуска с обеспечением необходимых свойств в прокате перед термической обработкой структура должна быть преимущественно бейнитной. С этой целью охлаждение проката после прокатки необходимо проводить в интервале скоростей  $1,0\text{--}1,7\text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ .

#### Выводы

Исследования влияния температурно-временных параметров термической обработки на изменение структуры и свойств хромомолибденовой стали показали, что в структуре металла после высокого отпуска имеются значительные участки с зернистой морфологией цементита, а после среднего отпуска существенных структурных изменений нет. Экспериментально установлено, что выдержка в течение 3 ч при высоком отпуске обеспечивает снижение микротвердости стали на 25% благодаря образованию в структуре 30% сфероидизированного перлита. Для снижения температуры отпуска при производстве сортового проката из хромомолибденовой стали необходимо в исходной горячекатаной заготовке иметь преимущественно бейнитную структуру, что возможно при охлаждении металла со скоростями  $1,0\text{--}1,7\text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ .

#### Литература

1. Г у д р е м о н Э. Специальные стали: Пер. с нем. Изд. 2-е сокр. и перераб. Т. I–II. М.: Металлургия, 1966.
2. Влияние скорости охлаждения на структурообразование и свойства углеродистой хромомолибденовой стали/ В. А. Луценко, Т. Н. Голубенко, М. Ф. Евсюков и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. ПДАБА. Днепропетровск. 2009. № 3. С. 56–60.