

**ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ГРАДИЕНТА СВОЙСТВ  
НАУГЛЕРОЖЕННОГО СЛОЯ СТАЛИ 16CRMNS5  
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ФИНИШНОЙ  
ТЕРМООБРАБОТКИ**

**Е. А. Парецкая, Е. П. Поздняков**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

**А. В. Радионов**

*ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин,  
Республика Беларусь*

Научный руководитель И. Н. Степанкин

**Введение.** Особенности термохимической обработки легированных сталей, относящихся к цементуемым сплавам, отличаются проведением закалки и низкотемпературного отпуска после науглероживания поверхности. Такой подход обусловлен традиционно низким содержанием углерода, что позволяет не опасаться повышения твердости сердцевины и, соответственно, достигать высокой вязкости основной части детали при получении на ее поверхности твердого и изнаноустойчивого слоя. При этом высокий удельный объем карбидной фазы в поверхностном слое, который возрастает с повышением содержания легирующих элементов, является основным источником повышения поверхностной твердости. Эта структурная особенность науглероженого слоя позволяет предположить, что проведение в качестве финишной обработки среднетемпературного отпуска может сохранить благоприятный градиент распределения твердости и одновременно с этим за счет структурных превращений в твердом растворе повысить вязкость и прочность материала в целом. Учитывая повышенный интерес отечественной металлургической промышленности к освоению современных марок сталей, соответствующим западноевропейским стандартам, целью работы было исследование влияния температуры отпуска на структуру и твердость стали 16CrMnS5, выплавляемой ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» в соответствии с DIN EN 10084. Работы по оценке влияния вакуумной цементации и нитроцементации на морфологию упрочненного слоя указанной стали показали, что глубина упрочнения, как правило, не превышает значения 0,8 мм при длительности насыщения 8 ч [1], [2]. Такая толщина слоя, с учетом возможной последующей отделочной обработки поверхности посредством шлифования, может оказаться недостаточной, что делает актуальным не только исследование влияния режимов отпуска, но и длительности процесса насыщения, который на большинстве отечественных предприятий в настоящее время осуществляется в условиях атмосферного давления в твердом или газообразном карбюризаторах.

**Объекты и методики исследований.** Объектами исследований являлись науглероженные слои стали 16CrMnS5. Цементацию проводили при температуре 920 °С в течение 8 и 12-ти ч в среде древесного угля, модифицированного углекислыми баридами. После химико-термической обработки (ХТО) проводили закалку в масле с температуры 860 °С и отпуск при температурах 200 и 400 °С в течение 1 ч. Обработку осуществляли на одних и тех же образцах, т. е. для проведения среднего отпуска использовали образцы предварительно отпущенные при температуре 200 °С. Для анализа структуры одну из поверхностей кубических образцов размерами 20 × 20 мм шлифовали и полировали, травили в 3–5%-м спиртовом растворе азотной кислоты. Металлографические ис-

следования проводили на оптическом микроскопе Метам РВ-22. Послойную оценку изменения строения поверхностного слоя и его твердости проводили последовательным механическим удалением с исследуемой поверхности образца слоя материала толщиной порядка 0,2 мм. Обнаженную для исследований внутреннюю поверхность металла полировали и подвергали дюрометрическим испытаниям на прессе Роквелла ТК-2М при нагрузке 1471 Н. Общее количество исследованных слоев определяли по результату дюрометрических испытаний, отражающих достижение минимальной твердости не менее чем на трех последовательно исследованных внутренних слоях. Их признавали сердцевинной образца, не затронутой химико-термической обработкой.

**Результаты исследований и их обсуждение.** После проведения всех этапов термохимической обработки микроструктура цементованных образцов представляет собой матрично-аустенитную матрицу с карбидными включениями (рис. 1 и 2). При исследовании структуры выявлены различия в морфологии карбидной фазы по объему слоя, имеющего заэвтектоидное строение. Как видно из сравнения обоих рисунков, увеличение длительности науглероживания позволяет существенно увеличить удельный объем карбидной фазы. Их количество на поверхности возрастает с 40 до 55 % (таблица).

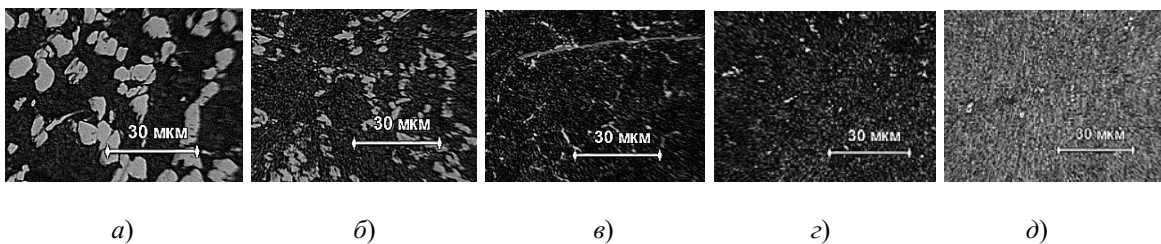


Рис. 1. Микроструктура стали 16CrMnS5, упрочненная посредством 8-часовой цементацией, закалкой и отпуском на различной глубине от поверхности:  
*a* – на поверхности слоя; *б* – 0,13 мм; *в* – 0,39 мм;  
*г* – 0,5 мм; *д* – 0,67 мм

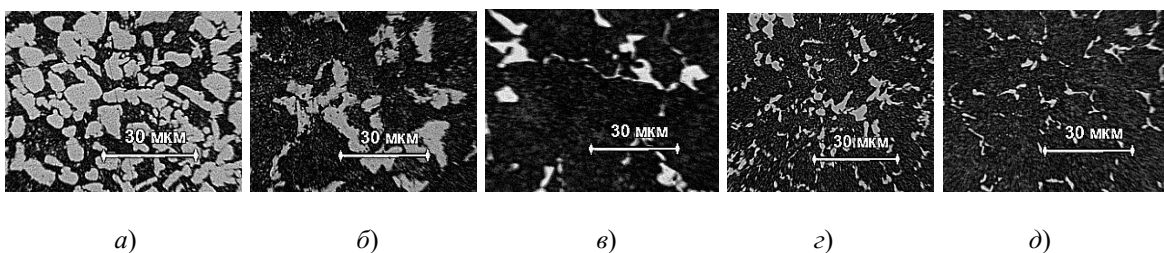


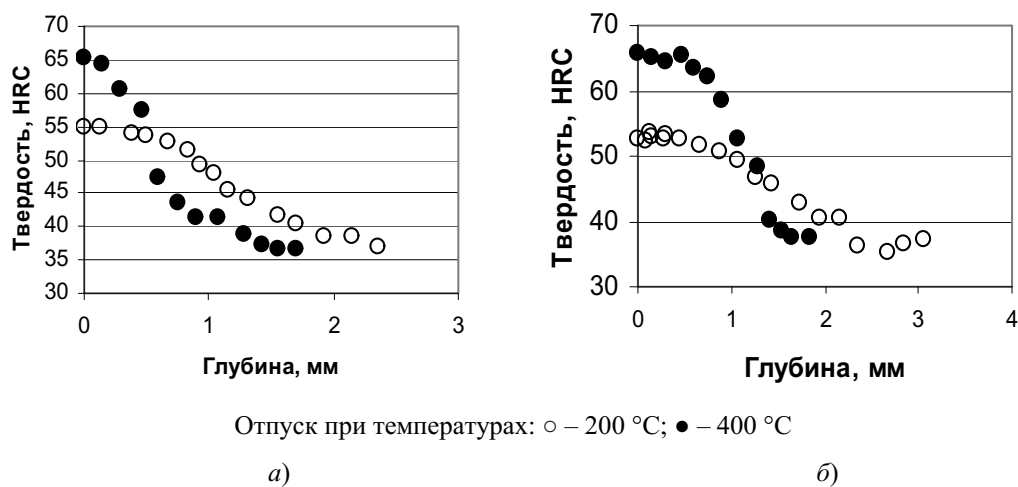
Рис. 2. Микроструктура стали 16CrMnS5, упрочненная посредством 12-часовой цементацией, закалкой и отпуском на различной глубине от поверхности:  
*a* – на поверхности слоя; *б* – 0,08 мм; *в* – 0,12 мм;  
*г* – 0,16 мм; *д* – 0,27 мм

**Удельная доля карбидной фазы (%) в модифицированном слое стали 16CrMnS5**

| Длительность цементации, ч | Глубина исследуемого слоя, мм |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |      |
|----------------------------|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|
|                            | 0                             | 0,08 | 0,12 | 0,13 | 0,14 | 0,16 | 0,27 | 0,31 | 0,39 | 0,45 | 0,5 | 0,67 |
| 12                         | 55                            | 28   | –    | –    | –    | 14   | 8    | 6    | –    | 4,5  | –   | –    |
| 8                          | 40                            | –    | –    | 21   | –    | –    | –    | –    | 6    | –    | 2   | 1    |

На поверхности образцов обеих партий карбидная фаза отличается в основном глобулярными включениями, среди которых встречаются вытянутые продолговатые частицы (рис. 1, *a* и 2, *a*). В подповерхностном слое с заэвтектоидной структурой на глубине уже порядка 0,1 мм наблюдается снижение доли карбидов. Их локализация при этом приходится в основном на границы зерен, о чем можно судить по характерному скелету, образуемому включениями (рис. 1, *б* и 2, *б*).

Сопоставление зависимостей распределения твердости по сечению образцов показывает, что закалка с низким отпуском позволяет достаточно хорошо отразить ожидаемую тенденцию в формировании модифицированного слоя в соответствии с длительностью насыщения. Твердость переходной зоны со значением ниже 40HRC наблюдается на глубине примерно 0,9 и 1,4 мм после упрочнения в течение 8 и 12 ч, соответственно (рис. 3).



*Рис. 3.* Распределение твердости по сечению упрочненных слоев стали 16CrMnS5, сформированных при различной длительности цементации:  
*a* – 8; *б* – 12 ч

Особый интерес представляет рассмотрение кривых распределения твердости после среднетемпературного отпуска. Как видно из рис. 3, в обоих исследованных случаях наблюдается смещение переходной зоны слоя в глубину образца. И по данному критерию глубина упрочненного слоя возрастает до 1,7 и 2,0 мм для длительности ХТО 8 и 12 ч, соответственно. В обоих случаях маркером достижения структуры сердцевины является твердость порядка 40HRC. Подобное изменение, по-видимому, может быть связано с некоторым перераспределением углерода, которое возможно при нагреве образцов до температуры среднего отпуска 400 °С. Особого внимания заслуживает достигнутая в результате среднего отпуска твердость сердцевины. Ее значение не снизилось

ниже 53–55 HRC, что является достаточно значительным достижением для сохранения на высоком уровне показателя контактной выносливости стали.

**Заключение.** Изучен процесс высокотемпературного насыщения углеродом стали 16CrMnS5. Выявлено, что увеличение длительности насыщения с 8 до 12 ч объемная доля карбидной фазы на поверхности возрастает с 40 до 55 %. При этом толщина заэвтектоидной зоны составляет не менее 0,5 мм, обеспечивая гарантированное получение площадки равной твердости после 12-часового насыщения. Сравнение величин твердости у образцов, подвергнутых низкотемпературному и среднетемпературному отпуску, показало, что ожидаемое снижение данного показателя оказалось приемлемым для выполнения требований по достижению высокой контактной выносливости материалов с упрочненным слоем. Величина твердости после среднетемпературного отпуска оказалась не ниже 53–55 HRC. При этом выявлено увеличение глубины модифицированного слоя по расположению конечного участка переходной зоны. Этот эффект, проявившийся для образцов обеих партий, по-видимому, обусловлен самодиффузией углерода в более глубокие слои в результате проведения финишного нагрева сплава до температуры 400 °С.

#### Л и т е р а т у р а

1. Влияние содержания остаточного аустенита и размера зерна на сопротивление усталости при изгибе стали, подвергнутой цементации в атмосферах низкого давления / П. Куля [и др.] // *Металловедение и термич. обработка металлов.* – 2014. – № 8. – С. 40–43.
2. Термодинамические и экспериментальные исследования низколегированных сталей после нитроцементации в атмосферах низкого давления / Т. Моррэй [и др.] // *Металловедение и термич. обработка металлов.* – 2014. – № 8. – С. 34–39.