

1. Проведение цементации в обоих случаях формирует мартенситно-аустенитную металлическую матрицу, в которой расположены разрозненные карбиды. Их объемная доля при увеличении цементации с 8-ми до 12-ти часов возросла с 18 до 26 %. Обнаружено, что в слое после 8-часовой нитроцементации начали формироваться мелкодисперсные карбонитриды, которые не обнаружены в слое после 6-часовой нитроцементации. Микротвердость поверхности всех исследованных слоев составила 7000–7500 МПа, а сердцевины – 3500–4000 МПа. Общая толщина цементованных слоев примерно в 2 раза больше, чем нитроцементованных – 1,9–2,1 мм и 1,0–1,1 мм соответственно.

2. Этап высокой износостойкости отмечен у всех исследованных слоев, который составил 16–20 тыс. циклов нагружения при амплитуде контактных напряжений 950 МПа. Из-за возникновения питтингов на поверхности лунки износа образцов интенсивность износа увеличилась. Скорость износа составила около 0,020–0,025 мм на каждые 1000 циклов нагружения. Следует отметить, что эта тенденция сохранилась только для науглероженных слоев, которые достигли предельного износа при 39–40 тыс. циклов нагружения. Для нитроцементованных образцов обнаружен аномальный износ при достижении глубины лунки износа 0,4 мм. Это связано с уменьшением общей толщины слоя в 2 раза. На глубине более 0,5 мм микротвердость резко снижается, а, соответственно, материал с малой твердостью не способен сопротивляться процессам контактной усталости при воздействии на него напряжений с амплитудой 950 МПа.

3. Для деталей машин с поверхностным упрочнением, у которых допустимый износ поверхности составляет около 0,6 мм, нитроцементацию нецелесообразно проводить из-за малой толщины диффузионного слоя.

#### Литература

1. Лахтин, Ю. М. Химико-термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин, Б. Н. Арзамасов. – М. : Металлургия, 1985. – 256 с.
2. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / Г. В. Борисенок [и др.]. – М. : Металлургия, 1981. – 424 с.
3. Устройство для испытания на контактную усталость и износ : пат. ВУ 7093 / И. Н. Степанкин, В. М. Кенько, И. А. Панкратов. – Опубл. 28.02.2011.

### **ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СЛОЕВ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ 18ХГТ**

**А. В. Рабков, Е. П. Поздняков**

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

**Д. В. Куис**

*Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск*

**Т. И. Сидоренко, А. М. Коротцов**

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

Научный руководитель И. Н. Степанкин

При выборе материалов для изготовления деталей машин конструкционного назначения инженерно-конструкторские работники ориентируются на механические и эксплуатационные свойства поверхностного слоя детали. Для придания требуемых

свойств поверхности изделий необходима модификация материала после их механической обработки. В качестве наиболее распространенных способов изменения свойств поверхности деталей применяются методы диффузионного насыщения – цементация, азотирование, нитроцементация и цианирование [1], [2]. Среди приведенных технологически простыми и менее длительными являются цементация и нитроцементация. В качестве сплава для изготовления таких деталей, как зубчатые колеса, вал-шестерни, распределительные валы, кулачки и других применяется конструкционная низколегированная сталь 18ХГТ. Наличие в ее химическом составе титана может существенно повлиять на структурообразование и свойства упрочненного сплава.

Целью работы является определение влияния продолжительности цементации и нитроцементации на структурообразование и микротвердость модифицированных слоев стали 18ХГТ.

Объектом исследований являлись диффузионные слои, сформированные на образцах из конструкционной стали 18ХГТ. Диффузионное насыщение осуществлялось двумя методами – цементацией и нитроцементацией. Цементацию проводили при температуре 920 °С в течение 8-ми и 12-ти часов в древесно-угольном карбюризаторе с добавлением углекислого бария, нитроцементацию – при температуре 850 °С в течение 6-ти и 8-ми часов в древесно-угольном карбюризаторе с добавлением карбамида. Окончательные структура и свойства слоев придавались путем проведения закалки с температуры 860 °С в масле и низком отпуске при температуре 200 °С в течение одного часа. Исследование микроструктуры осуществлялось на оптическом микроскопе Метам РВ-22. Травление микрошлифов проводилось в 2,5–5%-ном спиртовом растворе азотной кислоты. Распределение микротвердости по сечению диффузионных слоев определялось на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 2Н. Определение объемной доли карбидной фазы в заэвтектоидном слое определялось методом случайных секущих.

Структура поверхности термообработанных цементованных слоев представляет мартенситную основу с включениями остаточного аустенита и карбидов (рис. 1). При увеличении длительности цементации особых различий в морфологии карбидной фазы не выявлено. Карбидная фаза разделена на две зоны. В первой зоне карбиды представлены в виде отдельных сферических и продолговатых включений, максимальная длина которых не превышает 20 мкм. Однако при изменении времени насыщения углеродом данная зона увеличивается с 90 мкм (рис. 1, *а*) до 110 мкм (рис. 1, *б*). В данном слое объемная доля карбидной фазы в металлической матрице при увеличении времени насыщения увеличилась с 35 до 50 %. Во второй зоне карбидная фаза представляет собой цементитную сетку. Глубина распространения карбидов составила 0,30 и 0,40 мм после 8- и 12-часового насыщения соответственно.

Микроструктура нитроцементованных (рис. 2) слоев стали 18ХГТ отличается от цементованных (рис. 1) за счет присутствия избыточной карбонитридной фазы вместо карбидной. Причем карбонитриды значительно меньше по размерам, чем карбиды. Их величина не превышает 10 мкм, а морфология представлена отдельными мелкими сферическими с присутствием коагулированных продолговатых частиц. Объемная доля карбонитридов, определенная в поверхностном слое 0,05 мм, в обоих исследованных случаях составляет около 25 %. После 6-часовой ХТО (рис. 2, *а*) частицы распространены на глубину до 50 мкм от поверхности, в то время как после 8-часовой ХТО (рис. 2, *б*) их наличие обнаружено на расстоянии 200 мкм от поверхности образца. В микроструктуре нитроцементованных слоев стали 16CrMn5S5, которая является близким аналогом по химическому составу, видимые карбонитриды обнаружены в небольшом количестве только в образце, подвергнутом 8-часовой нитроцементации [2]. Это может свидетельствовать о том, что присутствие в химическом составе стали титана – сильного карбидо-

и нитридообразующего элемента [3], [4], – способствует появлению избыточных фаз, влияющих на износостойчивость сплава. Следует отметить наличие зоны, распространенной на глубине 0,10–0,13 мм от поверхности, с практически полным отсутствием видимых частиц (рис. 2, б).

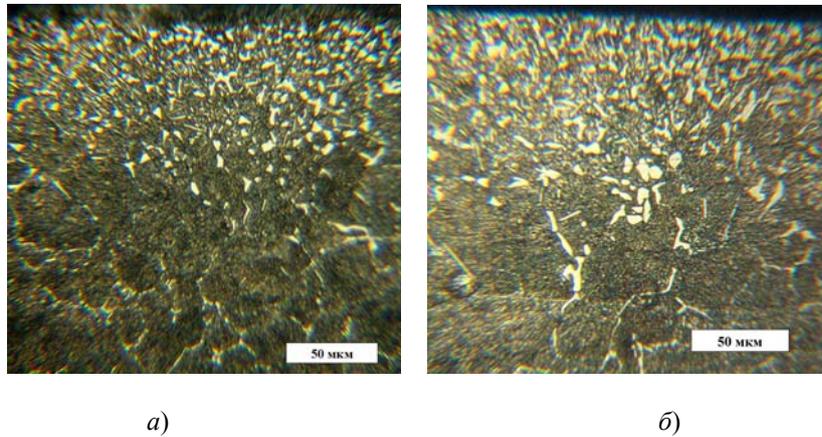


Рис. 1. Морфология карбидной фазы в заэвтектоидном слое стали 18ХГТ после проведения цементации в течение 8-ми (а) и 12-ти (б) часов

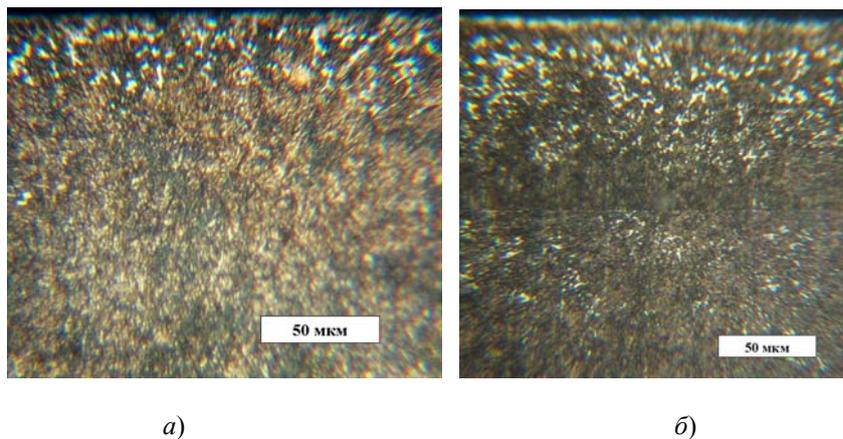


Рис. 2. Морфология поверхности нитроцементованных слоев стали 18ХГТ после проведения нитроцементации в течение 6-ти (а) и 8-ми (б) часов

Изучение графиков распределения микротвердости по сечению науглероженных слоев показало, что их зависимости имеют достаточно близкое распределение (рис. 3, а). Единственным различием является повышенная микротвердость поверхности у 12-часового насыщения, которая составила 7500 МПа, по сравнению с 8-часовым – 6500 МПа. Общая толщина цементованных слоев оказалась на уровне около 2,0 мм. Микротвердость сердцевины – 3800–4200 МПа.

Проведение нитроцементации позволило сформировать очень близкие зависимости распределения микротвердости по сечению слоев (рис. 3, б). Микротвердость поверхности составила 6800–7000 МПа. Затем она плавно понижается до твердости сердцевины, которая колеблется в достаточно широком интервале от 2800 до 3700 МПа. Главным отличием нитроцементованных слоев от цементованных оказалась уменьшенная в два раза толщина модифицированных слоев – 1,0–1,1 мм.

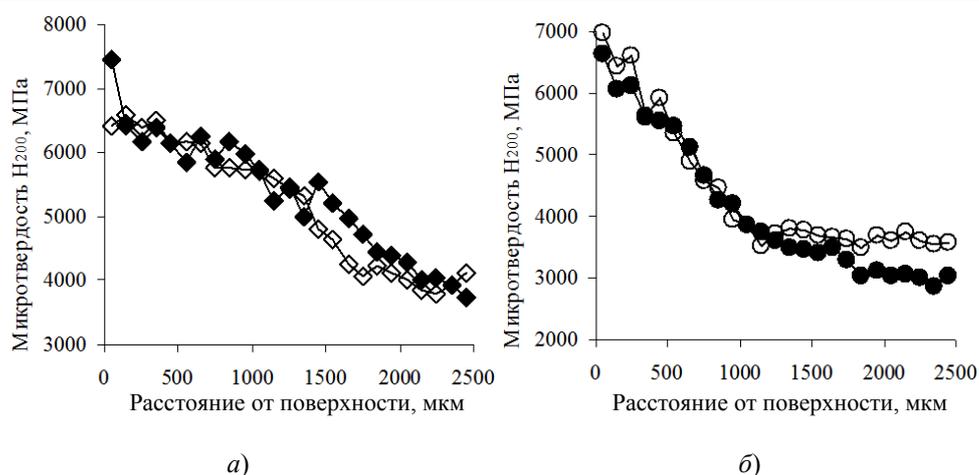


Рис. 3. Распределения микротвердости науглероженных (а) и нитроцементованных (б) слоев стали 18ХГТ:  
 ◊ – 8-часовая цементация; ◆ – 12-часовая цементация;  
 ○ – 6-часовая нитроцементация; ● – 8-часовая нитроцементация

В результате проведенных исследований диффузионных слоев стали 18ХГТ можно сделать следующие выводы:

1. Проведение цементации в обоих случаях формирует мартенситно-аустенитную матрицу, в которой расположены разрозненные карбиды сферической и продолговатой формы длиной не более 20 мкм. Их объемная доля при увеличении цементации с 8-ми до 12-ти часов возросла с 35 до 50 %, а толщина заэвтектоидной зоны возрастает с 0,3 до 0,4 мм. Микротвердость поверхностного слоя у образца после 12-ти часов ХТО достигла 7500 МПа, что на 1000 МПа выше, чем у образца после 8-часового насыщения. Общая толщина цементованных слоев оказалась на уровне около 2,0 мм.

2. В нитроцементованных слоях избыточная карбонитридная фаза в обоих случаях составила около 25 %. Однако увеличение длительности процесса с 6-ти до 12-ти часов показало диффузию углерода и азота на большую глубину – с 0,05 до 0,2 мм. Зависимости распределения микротвердости оказались достаточно близкими. Микротвердость поверхности составила 6800–7000 МПа. Общая толщина нитроцементованных слоев (1,0–1,1 мм) меньше в 2 раза по сравнению с цементованными (2,0 мм).

3. Присутствие небольшого количества титана в химическом составе стали 18ХГТ позволяет формировать модифицированные слои с более развитой карбидной и карбонитридной фазами, чем у стали 16CrMnS5, что может существенно повлиять на их износостойкость.

#### Литература

1. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / Г. В. Борисенко [и др.]. – М. : Металлургия, 1981. – 424 с.
2. Микроструктура и микротвердость термодифузионно-упрочненных слоев конструкционной стали 16CrMnS5 / И. Н. Степанкин [и др.] // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XXI Междунар. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и молодых ученых, Гомель, 22–23 апр. 2021 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – С. 84–88.
3. Лахтин, Ю. М. Химико-термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин, Б. Н. Арзамасов. – М. : Металлургия, 1985. – 256 с.
4. Прженосил, Б. Нитроцементация : пер. с чешского / Б. Прженосил. – Л. : Машиностроение, 1969. – 212 с. : ил.