

УДК 620.178

## **МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА НАУГЛЕРОЖЕННЫХ СЛОЕВ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ 35ХГСА, 40Х И 42СRМОS4**

**Е.П. Поздняков<sup>1</sup>, И.Н. Степанкин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет им. П.О.Сухого», Гомель, Республика Беларусь;

<sup>2</sup>Белорусский научно-исследовательский институт нефти республиканского унитарного предприятия «Производственное объединение «Белоруснефть», Гомель, Республика Беларусь

Причиной разрушения деталей, подвергающиеся в процессе эксплуатации циклическим, пульсирующим и знакопеременным нагрузкам, является усталость материала. На способность сопротивляться усталости первоочередное влияние оказывает твердость сплава [1]. Максимальную твердость поверхностных слоёв можно получить посредством проведения цементации, которая приобрела наибольшее распространение в сельскохозяйственном машиностроении. Традиционно цементуемые стали после термической обработки обычно имеют низкую твердость сердцевины, которая не превышает 30...35HRC. Такой величины твердости недостаточно для сопротивления подповерхностных слоёв пульсирующим контактными нагрузкам свыше 1000 МПа. Поэтому для решения этой задачи можно применить среднеуглеродистые конструкционные стали 40Х и 35ХГСА [2], которые содержат в качестве карбидообразующего элемента только хром. В настоящее время на ОАО «БМЗ – УКХ «БМК» производится новая марка стали 42CrMoS4, содержащая карбидообразующий молибден, изменяющий структурно-фазовый состав сплава, а, соответственно, и свойства.

Целью работы являлось установление влияния длительности цементации на микроструктуру и свойства конструкционных среднеуглеродистых сталей 40Х, 35ХГСА и 42CrMoS4. Объектом исследований являлись цементованные слои конструкционных среднеуглеродистых низколегированных сталей 40Х, 35ХГСА и 42CrMoS4. Упрочнение поверхностного слоя осуществлялось путем проведения цементации в древесноугольном карбюризаторе с добавкой карбоната бария BaCO<sub>3</sub> при температуре 920°C с длительностью активного насыщения 8 или 12 часов. Окончательные свойства формировались посредством проведения закалки в масле с температуры 860 °C и последующем низком отпуске при температуре 200 °C в течение 1 часа.

Металлическая матрица всех исследованных диффузионных слоев сталей 35ХГСА, 40Х и 42CrMoS4 представлена мартенситом отпуска и остаточным аустенитом (рис. 1). В структуре цементованных слоев стали 35ХГСА, помимо мартенсита и остаточного аустенита, дополнительно

присутствуют карбиды цементитного типа. Их объемная доля, определенная в поверхностном слое толщиной 0,2 мм, составила 10 % после 8-ми часового насыщения (рис. 1, а) и 15 % после 12-ти часового (рис. 1, б). Морфология включений представлена мелкодисперсными карбидами, равномерно распределенными по всей металлической основе, а также образующими прерывистую цементитную сетку вокруг бывшего зерна твердого раствора. Максимальный размер включений составил не более 2,0...3,0 мкм. Общая глубина зоны с избыточными включениями не превысила 0,2 мм для обоих случаев длительности насыщения.

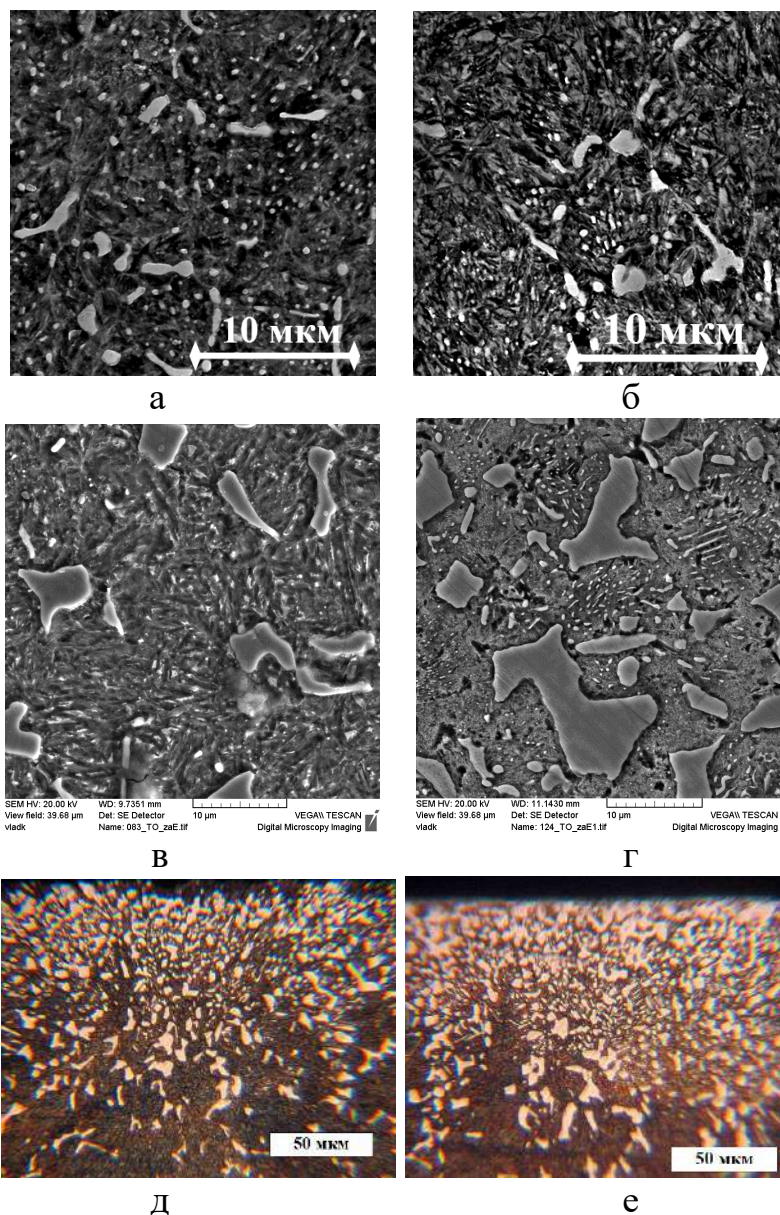


Рис.1 – Микроструктура термоупрочненных цементованных слоев стали: а, в, д – 8-ми часовое насыщение; б, г, е – 12-ти часовое насыщение  
а, б – 35XГСА; в, г – 40X и д, е – 42CrMoS4

В науглероженных слоях стали 40X карбидная фаза имеет существенные отличия от слоев в стали 35XГСА. Объемная доля карбидов в поверхностном слое глубиной до 0,2 мм увеличивается с 10...15 % до 35...40% при изменении длительности науглероживания с 8-ми (рис. 1, в)

до 12-ти часов (рис. 1, г). При увеличении длительности цементации происходит коагуляция карбидов, что приводит к росту максимального размера карбидов. В случае 8-ми часового насыщения максимальные размеры отдельных включений не превышают 10 мкм, а после 12-ти часового – достигают 20 мкм. Кроме крупных включений обнаружены равномерно распределенные по металлической матрице слоя мелкодисперсные карбиды. Общая глубина слоя с заэвтектидным строением достигла 0,5...0,7 мм.

Науглероженные слои стали 42CrMoS4 в своей структуре имеют более развитую карбидную фазу, чем аналогичные слои сталей 40X и 35ХГСА. При увеличении длительности диффузионного насыщения ее объемная доля увеличивается с 30 % до 40 %. Морфология включений после 8-ми часового насыщения представлена преимущественно разрозненными включениями глобулярной формы. При увеличении времени цементации до 12-ти часов происходит их коагуляция. Максимальные размеры отдельных карбидов составили 10 мкм после 8-ми часовой ХТО и достигают 30 мкм после увеличения длительности цементации до 12-ти часов. Общая толщина слоёв, содержащих избыточные карбиды, составила 0,7 мм.

Анализ графиков распределения микротвердости по сечению термоупрочненных цементованных слоев всех исследуемых сталей показал, что значительно большим значением микротвердости поверхности обладает сталь 35ХГСА. Этот факт свидетельствует о том, что кремний является одним из легирующих элементов, повышающим твердость металлической матрицы [3]. При увеличении длительности цементации с 8-ми до 12-ти часов микротвердость поверхности стали 35ХГСА не изменяется и составляет 9100МПа (рис. 2, а). При этом увеличение длительности диффузионного насыщения не приводит к существенному изменению зависимостей распределения микротвердости. Общая толщина слоев составила порядка 2,0...2,2 мм, а твердость сердцевины – на уровне 6000МПа.

При формировании науглероженных слоев на стали 40X (рис. 2, б) оказалось, что микротвердость поверхности значительно снижается по отношению к слоям, образованным на стали 35ХГСА. При 8-ми часовом насыщении этот показатель составил 7900МПа, а в случае повышения длительности насыщения до 12-ти часов – 8200МПа. Графики распределения микротвердости слоев стали 40X имеют значительные отличия от слоев стали 35ХГСА – наблюдается наличие более пологой площадки в подповерхностном слое. Эта зависимость возникла вследствие распространения карбидной фазы на большую глубину. Толщина науглероженных слоев при увеличении длительности насыщения с 8-ми до 12-ти часов составила 1,8...2,0 мм и 2,0...2,2 мм соответственно. Твердость сердцевины во всех исследованных случаях равна 5500...6000 МПа.

Анализ графиков распределения микротвердости науглероженных слоев стали 42CrMoS4 (рис. 2, в) показал, что зависимости распределения практически не отличаются при увеличении длительности науглероживания. Микротвердость поверхности составила 8500 МПа и 8300 МПа соответственно. Общая толщина слоев составила 1,9...2,0 мм. Микротвердость сердцевины в обоих исследованных случаях зафиксирована на уровне 6100 МПа.

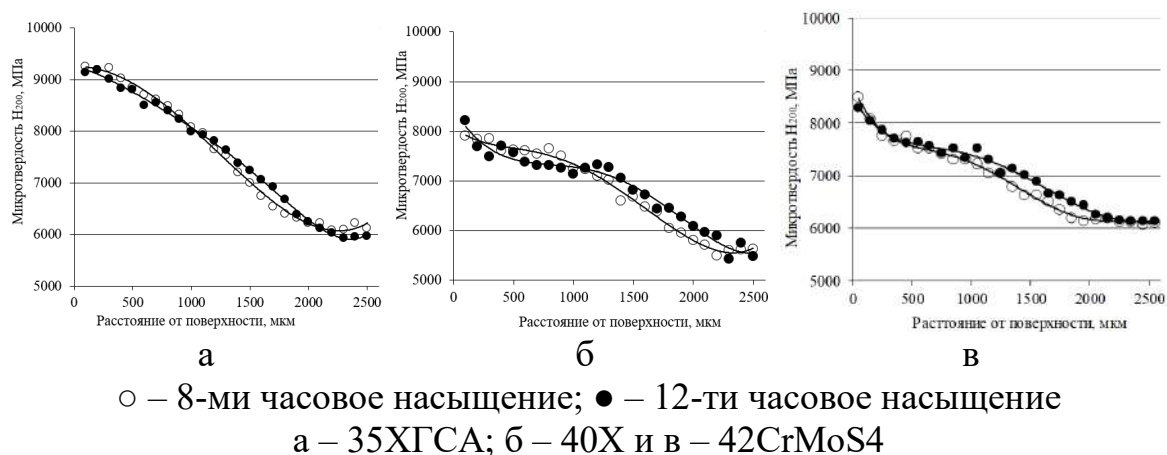
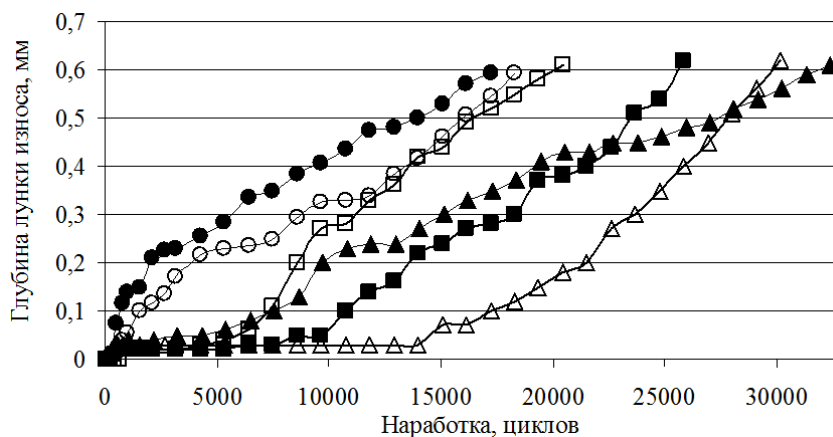


Рис. 2 – Распределение микротвердости по сечению термоупрочненных науглероженных слоев стали

Испытания на контактную усталость проводились на установке [4] при амплитуде контактных напряжений  $1300 \pm 65$  МПа. После проведения испытаний установлено, что у всех исследованных партий образцов присутствует этап приработки с контртелом, который длится порядка 1000...1500 циклов нагружения (рис. 3). У образцов стали 35ХГСА после 8-ми и 12-ти часовой ХТО и стали 40Х после 8-ми часовой после этапа приработки обнаружена высокая износоустойчивость, которая составила 6,4 тыс., 10 тыс. и 12,9 тыс. циклов нагружения соответственно. После чего интенсивность износа возрастает. У данных слоёв величина стойкости, определённая при достижении лунки износа 0,6 мм, составила в интервале 20...30 тыс. циклов.



светлые маркеры – 8 часовая ХТО; тёмные маркеры – 12 часовая ХТО;

Рис. 3 – Кривые износа науглероженных слоёв стали 35ХГСА (■, □), 40Х (▲, Δ) и 42CrMoS4 (●, ○)

Для остальных диффузионных слоёв зависимости износа несут иной характер. У цементованного слоя стали 40Х, подвергнутого 12-ти часовой ХТО, зависимости износа имеют характер близкий к равномерному. Максимальная стойкость данного слоя составила 32,5 тыс. циклов. Для цементованных слоёв стали 42CrMoS4 после этапа приработки сохраняется высокая скорость износа, которая сохраняется при достижении лунки износа порядка 0,2 мм. После этого интенсивность изнашивания снижается, но указанные слои обладают минимальной стойкостью среди всех испытанных – 17,2 тыс. (12 час. ХТО) и 18,3 тыс. (8 час. ХТО) циклов нагружения.

Металлографическим исследованием установлено, что все исследованные слои сопровождаются питтинговым изнашиванием. Уже на начальном этапе при первых контактах с контртелом материал образцов претерпевает пластическую деформацию. При увеличении наработки в деформированных объёмах материала образуются зоны наклёпа, в которых зарождаются и распространяются трещины контактной усталости, приводящие, в конечном счёте, к выкрашиванию объёмов деформированного материала. Образование питтингов сопровождается перераспределением действующих напряжений на контактной поверхности образцов и ускорению интенсивности износа.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- более развитая карбидная фаза формируется в слоях сталей 40Х и 42CrMoS4, содержащих повышенное количество карбидообразующих элементов (Cr, Mo) и пониженное содержание кремния (в качестве раскислителя), чем в стали 35ХГСА;

- наибольшая микротвёрдость поверхности зафиксирована у науглероженных слоёв стали 35ХГСА, содержащей кремний как легирующий элемент;

- максимальной износостойкостью обладают науглероженные слои стали 40Х. Их наработка достигла 30,2 тыс. и 32,4 тыс. циклов нагружения контактными напряжениями  $1300 \pm 65$  МПа после 8-ми и 12-ти часового насыщения соответственно.

#### Литература

1. Геллер Ю.А. Инструментальные стали: справочник / Ю.А, Геллер. – М. : Металлургия, 1984. – 584 с.

2. К вопросу влияния остаточного аустенита на износостойкость науглероженных слоёв стали 40Х и 35ХГСА / И.Н. Степанкин [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. / редкол. : В.Г.Залесский (гл. ред.) [и др.]. – Минск, – 2019. – С. 104–116.

3. Лахтин Ю.М. Химико-термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин, Б.Н. Арзамасов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.

4. Устройство для испытания материала на контактную усталость и износ: полез. модель ВУ 11176 / И.Н. Степанкин, Е.П. Поздняков, И.А. Панкратов, Е.А. Астапов. – Оpubл. 30.10.2016.