

## ИЗНОСОУСТОЙЧИВОСТЬ ЦЕМЕНТОВАННЫХ СЛОЕВ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Поздняков Е.П., Степанкин И.Н.

УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О.Сухого», Беларусь, г.Гомель  
246746, Беларусь, г. Гомель, пр. Октября, 48

*Аннотация.* Представлены результаты исследований влияния длительности цементации на структуру и свойства диффузионных слоев среднеуглеродистых низколегированных конструкционных сталей 35ХГСА, 40Х и 42CrMoS4. Установлено, что наибольшей износостойкостью обладают науглероженные слои стали 35ХГСА после 12-часовой и стали 40Х после 8-часовой химико-термической обработки, содержащие не более 15% карбидов размером до 10 мкм, 10...17% остаточного аустенита и 1,3...1,67% углерода.

**Ключевые слова:** износостойчивость; контактная усталость; конструкционные стали; цементация; холодновысадочный инструмент.

## WEAR RESISTANCE OF CEMENTED LAYERS OF MIDDLE-CARBON STRUCTURAL STEEL

Pozdnyakov E.P., Stepankin I.N.

Sukhoi State Technical University of Gomel, Republic of Belarus, Gomel  
246746, Republic of Belarus, Gomel, Oktyabrya ave., 48

*Abstract.* The results of studies of the influence of cementation duration on the structure and properties of diffusion layers of medium-carbon low-alloy structural steels 35CrMnSi4, 40Cr4 and 42CrMoS4 are presented. It has been established that the carburized layers of steel 35CrMnSi4 after 12 hours and steel 40Cr4 after 8 hours of chemical-thermal treatment, containing no more than 15% carbides up to 10 microns in size, 10...17% retained austenite and 1,3...1,67% carbon, have the greatest wear resistance.

**Keywords:** wear resistance; contact fatigue; structural steels; cementation; cold heading tool.

В штамповом производстве наибольшее распространение получили высоколегированные инструментальные стали X12M, X12MФ, X6BФ и др., содержащие крупные первичные карбиды [1]. В процессе пластической обработки эти карбиды разрушаются, что являет-

ся причиной появления трещин. Для мелкогазмерного холодногазсадочного инструмента, имеющего сложную геометрическую форму рабочей поверхности с мелкими элементами гравюры, данный вид дефекта является катастрофическим. Для устранения этого фактора можно применять среднеуглеродистые конструкционные стали 40X и 35XГСА после термодиффузионного упрочнения [2]. Они содержат в качестве карбидообразующего элемента хром. В настоящее время на Белорусском металлургическом заводе производится новая марка стали 42CrMoS4, содержащая сильный карбидообразующий элемент – молибден, – который может изменить структурно-фазовый состав и свойства сплава.

Упрочнение выбранных сталей осуществлялось путем проведения цементации в древесноугольном карбюризаторе с добавкой карбоната бария BaCO<sub>3</sub> при температуре 920°C с длительностью активного насыщения 8 и 12 часов. Окончательные свойства формировались после проведения закалки в масле с температуры 860 °C и последующем низкотемпературным отпуском при 200 °C в течение 1 часа. Интенсивность накопления усталостных повреждений в поверхностном слое образцов при многократном контактном воздействии на материал исследовали на установке для испытаний на контактную усталость и износ [3] при амплитуде контактных напряжений 1300±65 МПа. Объемная доля и морфология карбидной фазы анализировалась в слое, толщиной 0,2 мм от поверхности образца.

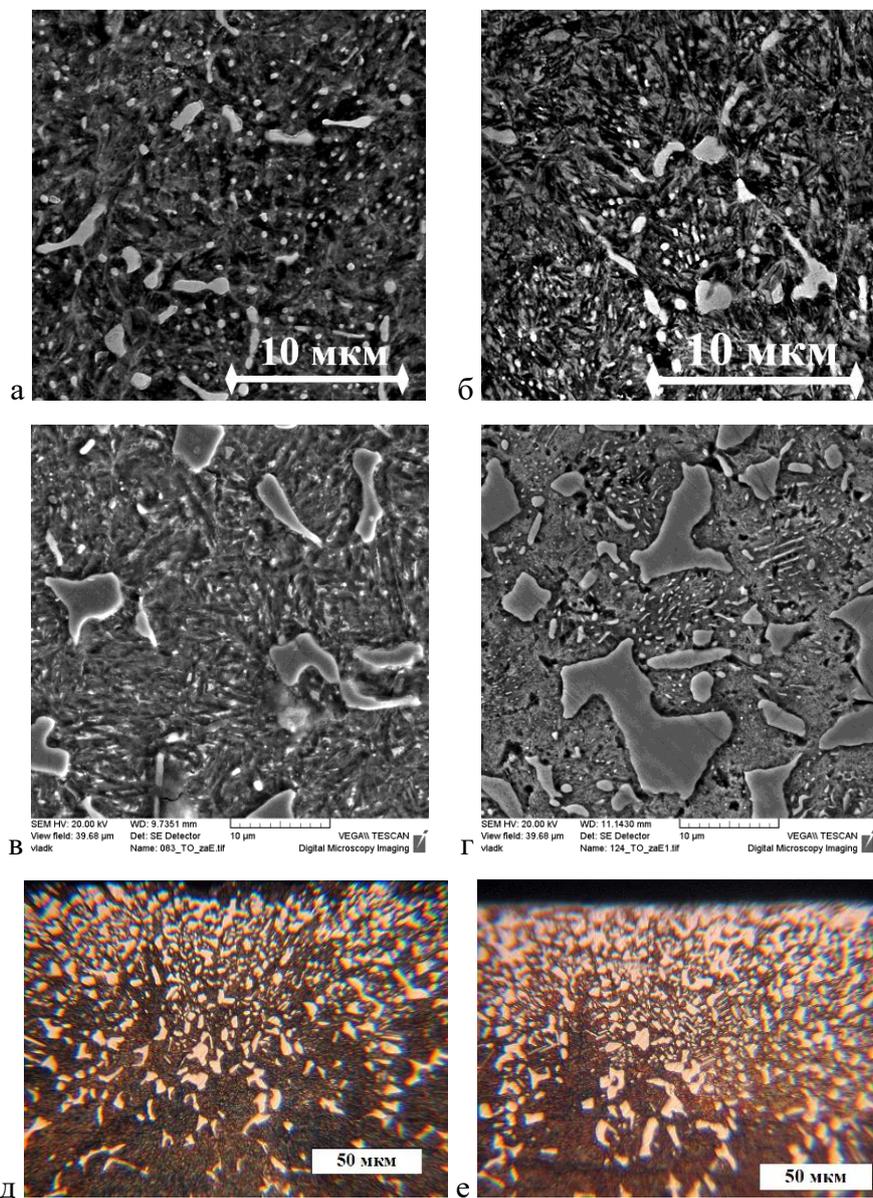
После всего цикла термодиффузионного упрочнения модифицированные слои состоят из мартенсита отпуска, остаточного аустенита и карбидной фазы (рис. 1). В структуре цементованных слоев стали 35XГСА объемная доля составила 10 % после 8-часового (рис. 1, а) и 15 % после 12-часового насыщения (рис. 1, б). 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...3 мкм. Общая глубина зоны с избыточными включениями не превысила 0,2 мм для обоих случаев длительности насыщения.

В цементованных слоях стали 40X содержание и морфология карбидной фазы значительно отличается от слоев стали 35XГСА. Ее объемная доля возрастает с 15 % до 40% при увеличении длительности науглероживания с 8 (рис. 1, в) до 12 часов (рис. 1, г). При этом происходит коагуляция и увеличение максимального размера включений с 10 до 20 мкм. Общая толщина заэвтектоидного слоя также увеличивается с 0,5 до 0,7 мм.

Цементованные слои стали 42CrMoS4 в своей структуре имеют более развитую карбидную фазу, чем аналогичные слои сталей 40X и 35XГСА. При увеличении длительности диффузионного насыщения ее объемная доля увеличивается с 30 % до 40 %. Морфология включений после 8-часового насыщения представлена преимущественно

разрозненными включениями глобулярной формы. При увеличении времени цементации с 8 до 12 часов происходит их значительный рост с 10 мкм до 30 мкм. Общая толщина обоих слоёв, содержащих избыточные карбиды, составила 0,7 мм.

Дифрактограммы, полученные от всех исследованных поверхностных слоев, показали отсутствие специальных карбидов. Вся карбидная фаза представлена цементитом.



а, в, д – 8-ми часовое насыщение; б, г, е – 12-ти часовое насыщение

Рис.1 – Микроструктура термоупрочненных цементованных слоев стали:

а, б – 35XГСА; в, г – 40X и д, е – 42CrMoS4

Наибольшим значением микротвердости поверхностных слоев обладает сталь 35XГСА. Этот факт свидетельствует о том, что кремний является одним из легирующих элементов, значительно повышающим твердость  $\alpha$ -твердого раствора [4]. При увеличении

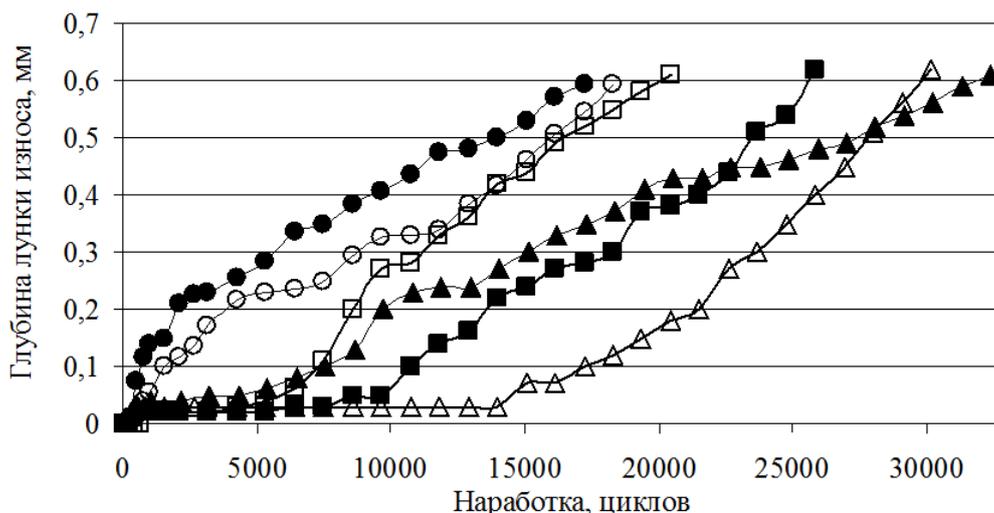


жание углерода значительно повышается. При этом стоит отметить, повышение содержания углерода увеличивает объемную долю остаточного аустенита.

Таблица 1 – Количество остаточного аустенита и углерода на поверхности науглероженных слоев конструкционных сталей 35ХГСА, 40Х и 42CrMoS4

Показатель	Марка стали					
	35ХГСА		40Х		42CrMoS4	
	Длительность цементации, часов					
	8	12	8	12	8	12
Количество углерода на поверхности	1,10	1,3	1,67	>1,80	>1,80	>1,80
Объемная доля остаточного аустенита, %	7,0	10,0	17,0	18,0	11,7	13,3

Испытания на контактную усталость при напряжениях  $1300 \pm 65$  МПа показали, что у всех исследованных партий образцов присутствует этап приработки с контртелом, который длится порядка 1000...1500 циклов нагружения (рис. 3). У слоев стали 35ХГСА после 8-ми и 12-ти часовой ХТО и стали 40Х после 8-ми часовой после этапа приработки обнаружена высокая износостойчивость, которая составила 6,4 тыс., 10 тыс. и 14тыс. циклов нагружения соответственно. После этапа высокой износостойчивости интенсивность износа слоев резко возрастает. У данных слоёв величина стойкости, определённая при достижении лунки износа 0,6 мм, составила в интервале 20...30 тыс. циклов нагружения.



светлые маркеры – 8-часовая ХТО; темные маркеры – 12-часовая ХТО;

Рис. 3 – Кривые износа науглероженных слоёв сталей 35ХГСА (■, □), 40Х (▲, △)

и 42CrMoS4 (●, ○) при амплитуде контактных напряжений  $1300 \pm 65$  МПа

Для остальных диффузионных слоёв этап высокой износостойкости отсутствует. У цементованного слоя стали 40X, 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 наблюдается высокая скорость изнашивания, 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. циклов нагружения после 12-часовой и 18,3 тыс. после 8-часовой цементации. Отсутствие этапа высокой износостойкости данных слоев является следствием повышенного содержания углерода (более 1,8 %), высокой доли (более 30 %) крупных (более 10 мкм) карбидов.

Металлографическим исследованием установлено, что все исследованные слои сопровождаются питтинговым изнашиванием (рис. 4). 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. Особенностью быстрого износа слоев стали 42CrMoS4 на начальном этапе испытаний является скалывание объёмов сплава на боковых частях образцов, имеющих развитое заэвтектоидное строение (рис. 4 г), провоцирующего уменьшение площади контакта и повышение действующих напряжений.

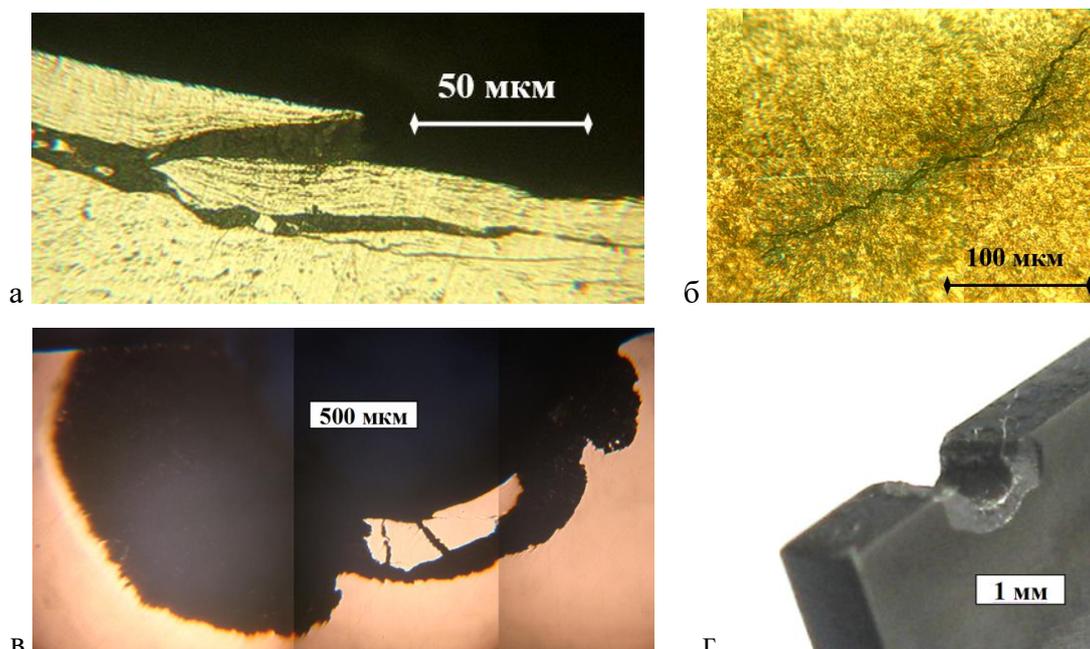


Рис. 11 – Особенности разрушения цементованных слоев сталей 35ХГСА и 40Х (а-в) и скалывание заэвтектоидной зоны слоев стали 42CrMoS4 (г)

**Заключение.** Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. В цементованных слоях сталей 40Х и 42CrMoS4, содержащих большее количество сильных карбидообразующих элементов, чем в стали 35ХГСА, формируется слой с более развитой карбидной фазой. В стали 35ХГСА повышенное содержание кремния снижает количество углерода и объемную долю карбидной фазы в поверхностном слое;
2. Наибольшая микротвердость поверхности зафиксирована у науглероженных слоев стали 35ХГСА, содержащей кремний как легирующий элемент;
3. У термоупрочненных слоев стали 35ХГСА после 12-часовой и стали 40Х после 8-часовой цементации при напряжениях  $1300 \pm 65$  МПа появляется этап высокой износостойкости, который составил 10 тыс. и 14тыс. циклов нагружения соответственно. Эти слои содержат не более 15% карбидов размером до 10 мкм, 10...17% остаточного аустенита и углерода на уровне 1,3...1,67%.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геллер, Ю.А. Инструментальные стали: справочник / Ю.А. Геллер. – М. : Металлургия, 1984. – 584 с.
2. К вопросу влияния остаточного аустенита на износостойкость науглероженных слоев 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. Устройство для испытания материала на контактную усталость и износ: полез. модель ВУ 8260 / И.Н. Степанкин, И.А. Панкратов, В.М. Кенько, Е.П. Поздняков, Л.В. Степанкина. – Оpubл. 30.06.2012.

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

5. Ворошнин, Л. Г. Теория и технология химико-термической обработки : учебное пособие / Л. Г. Ворошнин, О. Л. Менделеева, В. А. Сметкин. – М. : Новое знание; Минск : Новое знание, 2010. – 304 с. : ил