

В.И. Громов, А.Н. Уткина, Н.А. Курпякова

**ДИСПЕРСИОННОЕ ТВЕРДЕНИЕ
ЦЕМЕНТОВАННОГО СЛОЯ ТЕПЛОСТОЙКИХ
СТАЛЕЙ МАРТЕНСИТНОГО КЛАССА
ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ**

Методом оптической микроскопии выполнены металлографические исследования влияния режимов термической обработки на фазовые превращения в диффузионном слое конструкционной малоуглеродистой теплостойкой дисперсионно-твердеющей хромоникелевой стали мартенситного класса после вакуумной цементации. Показано влияние последовательно проводимых отпусков и обработки холодом на распад остаточного аустенита и мартенсита с выделением карбидной фазы, связь между фазовым составом и твердостью диффузионного слоя.

E-mail: gvi1965@mail.ru

Ключевые слова: диффузионный слой, карбидная фаза, аустенит, мартенсит, упрочнение, вакуумная цементация.

В настоящее время на машиностроительных предприятиях для упрочнения поверхности ответственных деталей все более широкое применение находят процессы вакуумной химико-термической обработки. Одним из таких процессов является вакуумная цементация. Процесс проходит при низких давлениях насыщающей среды в предварительно вакуумированных камерах специализированных установок, тем самым исключается окисление поверхности диффузионных слоев. Вакуумная цементация широко используется для поверхностного упрочнения деталей автомобильных двигателей, бурового инструмента и других изделий, изготовленных из сталей переходного класса. Для применяемых в авиационной промышленности теплостойких дисперсионно-твердеющих сталей технологические процессы упрочнения диффузионных слоев после вакуумной цементации в достаточной мере не разработаны.

В данной работе рассмотрен эффект вторичного твердения в цементованном слое после вакуумной цементации и термической обработки. Поэтапная иллюстрация происходящих фазовых превращений выполнена с помощью металлографического анализа.

Методика проведения исследований. Объектом исследования являлись цилиндрические образцы диаметром 20 и высотой 10 мм из теплостойкой конструкционной малоуглеродистой дисперсионно-твердеющей хромоникелевой стали мартенситного класса, прошедшие вакуумную цементацию в среде ацетилена, ускоренное охлаждение газообразным азотом во избежание образования грубых

выделений карбидной фазы и упрочняющую термическую обработку, включающую закалку в масло, трехкратный высокий отпуск и обработку холодом. Исследование микроструктуры проводилось в соответствии с ГОСТ 8233 на металлографических шлифах после травления в 4%-ном спиртовом растворе азотной кислоты на оптическом микроскопе «OLYMPUS GX51», оснащенный программой визуализации видеоизображения «AnalySIS 5.0» при увеличениях 100 и 1000 крат. Измерение распределения микротвердости по толщине диффузионных слоев после операций термической обработки проводилось по ГОСТ 9450 на микротвердомере ПМТ-3.

Результаты исследований и их обсуждение. Толщина диффузионного слоя на образце после вакуумной цементации в среде ацетиленового газа и ускоренного охлаждения в газообразном азоте составила 1,3 мм. Распределение концентрации углерода в диффузионном слое – параметр, который совместно с последующей термической обработкой определяет фазовый состав и структуру диффузионного слоя. Концентрация углерода c , %, в диффузионном слое теплостойкой дисперсионно-твердеющей хромоникелевой стали мартенситного класса после вакуумной цементации на расстоянии от поверхности l , мм, приведена ниже:

l	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
c	1,12	1,05	1,02	0,96	0,96	0,94	0,89	0,84

При полученной концентрации углерода после цементации и ускоренного охлаждения микроструктура диффузионного слоя – мартенсит и аустенит с преобладанием аустенитной фазы. В приповерхностном слое наблюдается выделение частиц избыточной карбидной фазы, состоящей преимущественно из легированного цементита, ориентированного по границам аустенитных зерен на глубину до 0,35 мм. Мелкодисперсные специальные карбиды, обеспечивающие теплостойкость, присутствуют по всей толщине слоя. Твердость поверхности составила 48–50 HRC (рис. 1).

После цементации образцы проходили длительный высокий отпуск, при котором из аустенита выделились дисперсные карбиды. В твердом растворе уменьшилась концентрация углерода и карбидообразующих легирующих элементов, что способствовало распаду аустенита с образованием мартенситной фазы. В микроструктуре цементованного слоя внутри аустенитных зерен хорошо просматриваются иглы образовавшегося мартенсита (рис. 2). Твердость поверхности повысилась до 52–54 HRC. Образовавшиеся дисперсные карбиды практически не растворяются при повторном нагреве, что в итоге позволяет уменьшить количество остаточного аустенита при последующей закалке.

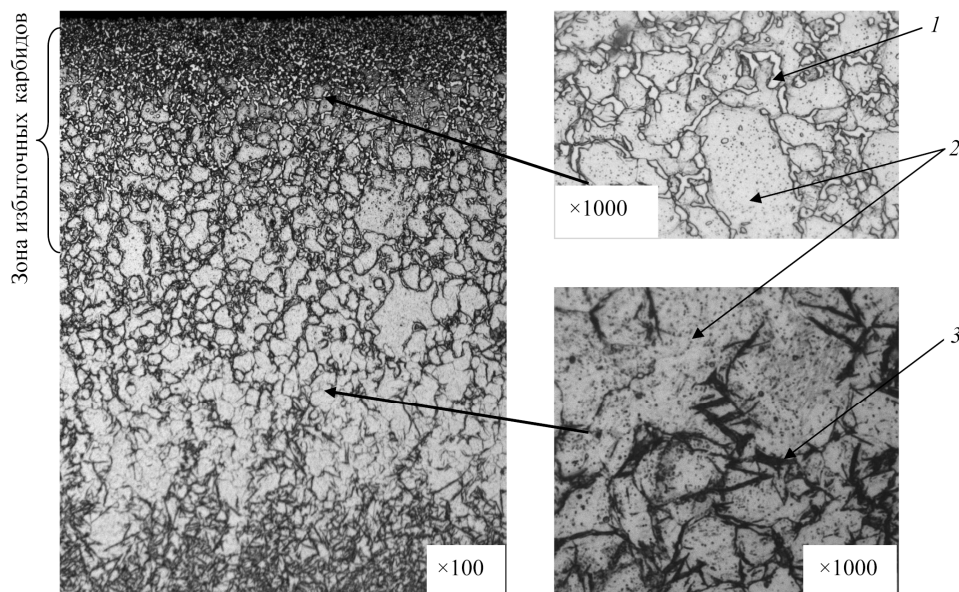


Рис. 1. Микроструктура цементованного слоя теплостойкой дисперсионно-твердеющей хромоникелевой стали мартенситного класса после вакуумной цементации и ускоренного охлаждения:

1 – избыточные карбиды; *2* – специальные карбиды в аустенитных зернах; *3* – иглы мартенсита

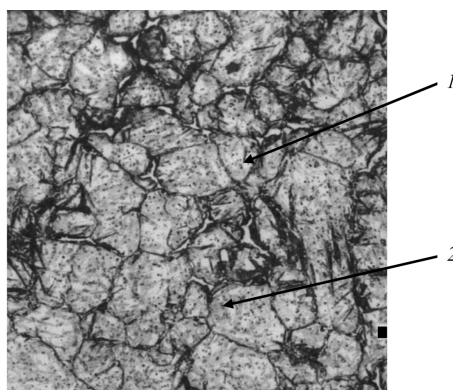


Рис. 2. Микроструктура цементованного слоя теплостойкой дисперсионно-твердеющей хромоникелевой стали мартенситного класса после вакуумной цементации и высокого отпуска:

1 – специальные карбиды в аустенитных зернах; *2* – мартенсит, получившийся при распаде аустенита

При нагреве под закалку теплостойких сталей температура подбирается с целью наиболее полного растворения карбидной фазы, при этом необходимо избегать перегрева материала, приводящего к росту зерна. Микроструктура цементованного слоя после закалки представлена на рис. 3 и состоит в приповерхностной части из аусте-

нита, специальных карбидов и единичных, не растворившихся при нагреве и выдержке, включений легированного цементита (избыточных карбидов), далее в глубь слоя – аустенит, в переходной части – мартенсит и остаточный аустенит. Микроструктура сердцевины – малоуглеродистый мартенсит. Твердость слоя 44–46 HRC.

Первый отпуск дисперсионного твердения проводился непосредственно после закалки, что способствовало выделению из аустенита специальных карбидов, а из мартенсита – легированного цементита. Второй отпуск дисперсионного твердения при той же температуре и времени выдержки повышает твердость до 52–56 HRC, при этом сохраняется достаточно большое количество (порядка 20–25 %) остаточного аустенита. Частицы легированного цементита в приповерхностной части слоя укрупняются и выделяются преимущественно по границам зерен (рис. 4).

Для более полного превращения остаточного аустенита проводилась обработка холодом при $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Количество остаточного аустенита снизилось до 3–4 %, твердость диффузионного слоя повысилась до 60–62 HRC. На рис. 5 представлена микроструктура диффузионного слоя после обработки холодом – в приповерхностной части наблюдается мартенсит и избыточные карбиды на глубину до 0,05 мм в виде хаотично расположенных частиц неправильной гео-

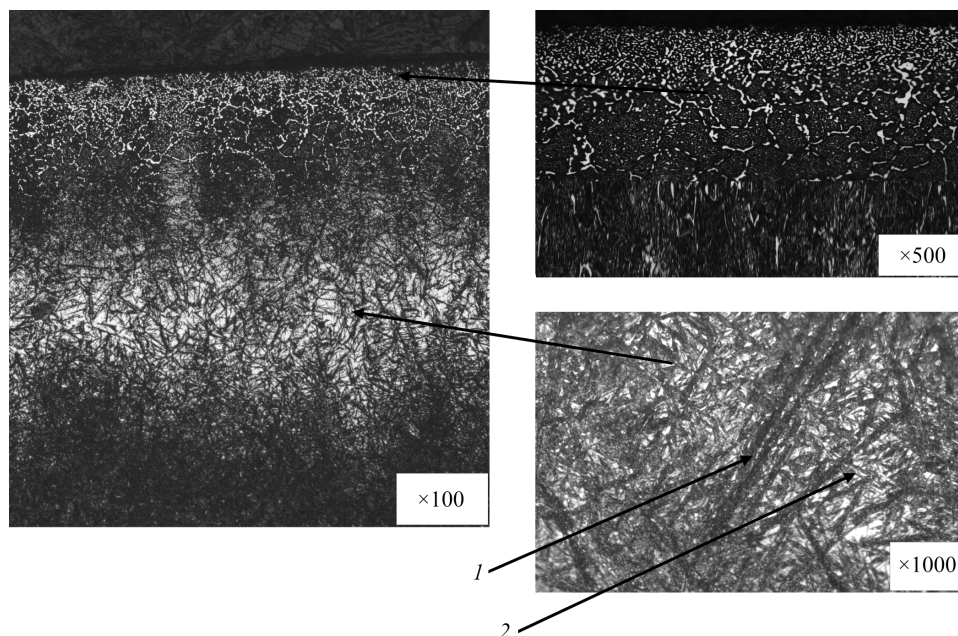


Рис. 3. Микроструктура цементованного слоя теплостойкой дисперсионно-твердеющей хромоникелевой стали мартенситного класса после вакуумной цементации, высокого отпуска и закалки

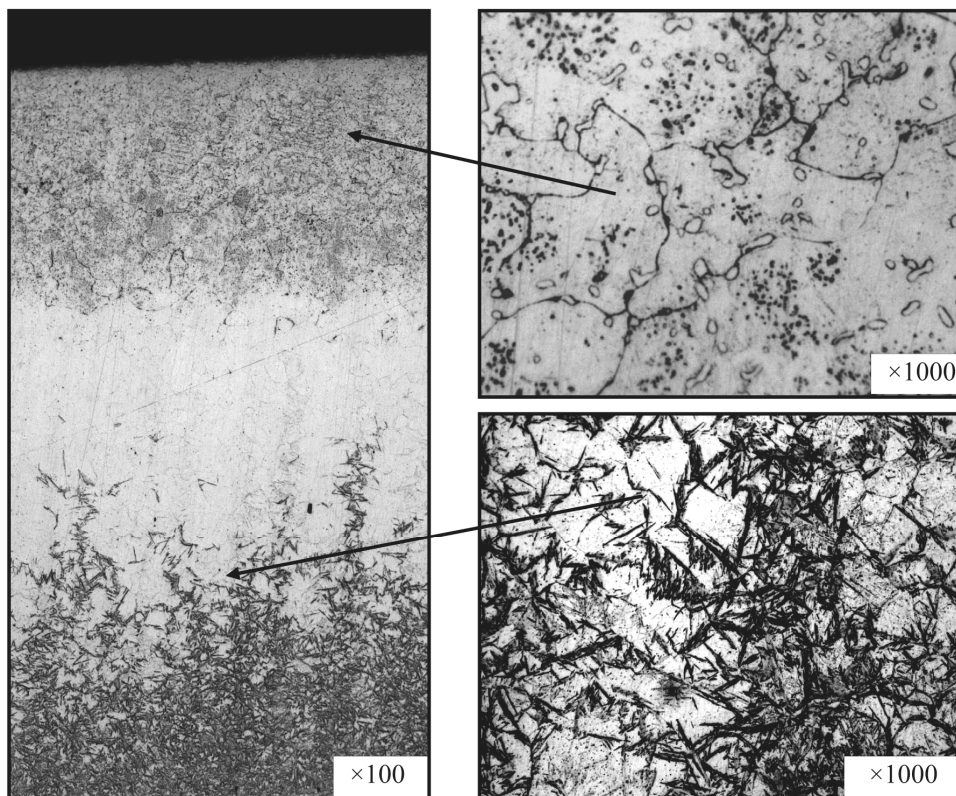


Рис. 4. Микроструктура цементованного слоя теплостойкой дисперсионно-твердеющей хромоникелевой стали мартенситного класса после вакуумной цементации, высокого отпуска, закалки, двух отпусков дисперсионного твердения и обработки холодом:

1 – мартенсит, образовавшийся при закалке; *2* – мартенсит, образовавшийся при последующей термической обработке

метрической формы, далее, на глубину до 0,25 мм – в виде разорванной сетки по границам зерен. В переходной части слоя структура состоит из мартенсита и остаточного аустенита. В структуре переходной зоны – более крупные темные иглы – мартенсит, образовавшийся после закалки, а мелкие иглы, протравившиеся слабее – мартенсит, полученный в процессе распада аустенита при обработке холодом и в процессе дисперсионного твердения. Специальные карбиды наблюдаются по всей толщине слоя.

После обработки холодом проводился третий отпуск для снятия напряжений. Твердость понизилась на 1–2 единицы HRC за счет отпуска мартенсита и составила 60–60,5 HRC.

Таким образом, микроструктура после упрочняющей термической обработки представляет собой в приповерхностной части мартенсит и избыточные карбиды (легированный цементит) на глубину

до 0,05 мм в виде хаотично расположенных частиц неправильной геометрической формы, далее, на глубину до 0,25 мм – в виде разорванной сетки по границам зерен. В переходной части слоя структура состоит из мартенсита и остаточного аустенита. Специальные карбиды наблюдаются по всей толщине слоя.

Динамика изменения распределения микротвердости цементованного слоя в процессе упрочняющей термической обработки представлена на рис. 5.

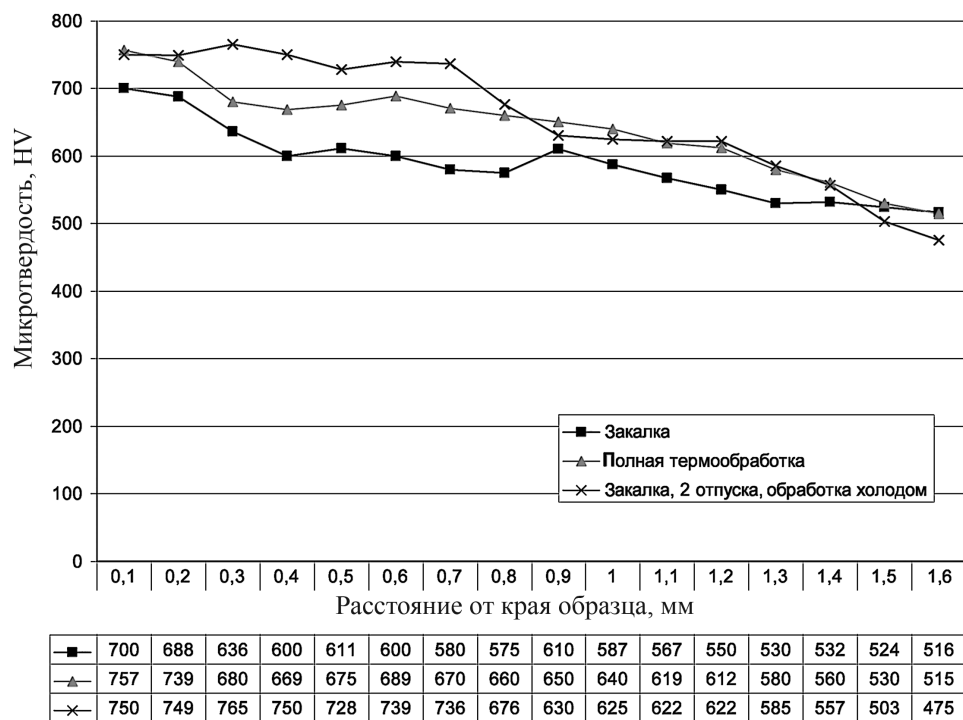


Рис. 5. Изменение микротвердости диффузионного слоя после вакуумной цементации в процессе термической обработки

Выводы. В процессе проведения упрочняющей термической обработки происходит изменение структуры цементованного слоя теплостойких дисперсионотвердеющих сталей мартенситного класса: полученный после закалки легированный аустенит претерпевает превращение с образованием мартенсита и карбидной фазы, упрочняющих диффузионный слой.

Статья поступила в редакцию 31.10.2011