

10, октябрь 2015

УДК 621.785.5

Вакуумная комбинированная химико-термическая обработка стали ВКС-10

*Мохова А.С., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Материаловедение»*

*Научный руководитель: Смирнов А.Е., к.т.н, доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Материаловедение»
bauman@bmstu.ru*

Совершенствование технологии производства зубчатых передач редукторов газотурбинных двигателей – одна из важнейших проблем для авиационной отрасли. Актуальность ее решения возрастает в связи с разработкой газотурбинных двигателей нового поколения, для которых характерен значительный рост силовой и тепловой напряженности всех его деталей, включая зубчатые колеса [1].

Зубчатые колеса относятся к наиболее сложным в конструктивном и технологическом отношении деталям. Для них высокий уровень рабочих напряжений сочетается с требованиями высокой долговечности и эксплуатационной надежности. Выполнение этих требований диктует необходимость применения новых более теплостойких сталей и новых высокоэффективных процессов химико-термической обработки (ХТО).

Производственная практика и результаты исследований показывают, что цементуемая сталь ВКС-5 не отвечает возросшим требованиям. Эта сталь не обладает достаточной теплостойкостью. Твердость цементованного слоя этой стали при кратковременной выдержке при температуре 550 °С снижается с 60-61 HRC до 54-56 HRC, что служит причиной снижения износостойкости и контактной прочности.

В соответствии с возникшими проблемами, специалистами ВИАМа разработана теплостойкая сложнолегированная сталь ВКС-10 (13ХЗНЗМ2ВФБ-Ш). В результате комплексного легирования такими карбидообразующими элементами, как Cr, Mo, W, V, Nb, теплостойкость стали повышена до 450 °С. В присутствии таких элементов образование в структуре дисперсной карбидной фазы обеспечивает измельчение зеренной

структуры, повышение статической и циклической прочности. Введение никеля (~3%) способствует увеличению ударной вязкости, хладостойкости и прокаливаемости.

Между тем главное функциональное назначение сталей – обеспечение возросших требований к эксплуатационным свойствам зубчатых колес – контактной и циклической прочности, износостойкости, уровень которых зависит от свойств поверхностного слоя. В этой связи для реализации потенциальных возможностей новой сложнолегированной стали требуется разработка и внедрение современных упрочняющих технологий. К ним относится процесс комбинированной химико-термической обработки, сочетающий в себе возможности и преимущества высокотемпературной (вакуумная цементация и нитроцементация) и низкотемпературной обработки (ионно-плазменное и вакуумное азотирование, жидкостная карбонитрация).

Разработка технологии комбинированного процесса для новой теплостойкой стали открывает возможности для повышения служебных свойств ответственных деталей турбо- и моторостроения.

Задачи настоящей работы – исследование влияния параметров вакуумной цементации (ВЦ) (общего времени процесса и соотношений времен активной и пассивной стадий циклической подачи среды) на параметры диффузионных слоев и анализ влияния ионно-плазменного азотирования (ИА) на свойства приповерхностной части диффузионного слоя.

Материалы и методики исследований

Объекты исследований изготавливали из стали мартенситного класса 13ХЗНЗМ2ВФБ-Ш (ВКС-10), состав которой приведен в таблице.

Марка стали	Химический состав, %											
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	W	Si	V	Nb	Al	S	P
ВКС-10	0,1-0,15	3,0-3,4	2,7-3,0	1,9-2,3	0,3-0,6	0,2-0,5	0,17-0,37	0,05-0,15	0,05-0,15	≤0,04	≤0,015	≤0,015

Особенность стали – способность к интенсивному науглероживанию поверхности в результате образования в диффузионном слое повышенной объемной доли избыточной карбидной фазы. Эта особенность может обеспечить требования к поверхностному слою зубьев колес после цементации.

Высокая теплостойкость стали обеспечена комплексным легированием хромом, молибденом, вольфрамом, ванадием и ниобием. Благодаря такой системе легирования сталь способна длительно сохранять при нагреве требуемую высокую твердость (60-63 HRC) цементованной поверхности.

Вакуумную цементацию осуществляли на опытной установке по циклическому режиму при температуре 920 °С. Рабочая среда – ацетилен. Общее время цементации варьировали от 1 до 3 ч. Параметры циклической подачи ацетилена изменяли следующим образом: время активной стадии τ_a составляло от 1 до 7 мин, время пассивной стадии τ_n – от 27 до 57 мин. При этом суммарное время активных и пассивных стадий цикла за все время насыщения составляло от 5 до 16 мин и от 55 до 164 мин соответственно. Таким образом соотношение суммарных времен активных и пассивных стадий циклической подачи среды варьировали от 0,06 до 0,12.

После ВЦ проводили упрочняющую термическую обработку, которая включала высокий отпуск (660 °С, 6 ч, в карбюризаторе), закалку (1010 °С, 1 ч, масло), двукратный отпуск (510 °С, 1,5 ч, воздух), обработку холодом (-70 °С, 2 ч) и заключительный отпуск для снятия внутренних напряжений (510 °С, 1,5 ч, воздух). (рис. 1).

После упрочняющей ТО проводили шлифование с припуском 0,2 мм.

На заключительной стадии обработки проводили ионно-плазменное азотирование. Процесс осуществляли при температуре 500 °С в атмосфере 95 % N₂ + 5 % H₂. Длительность ИА составляла 10 ч при давлении 2 мм рт.ст. и напряжении на катоде 400 В.

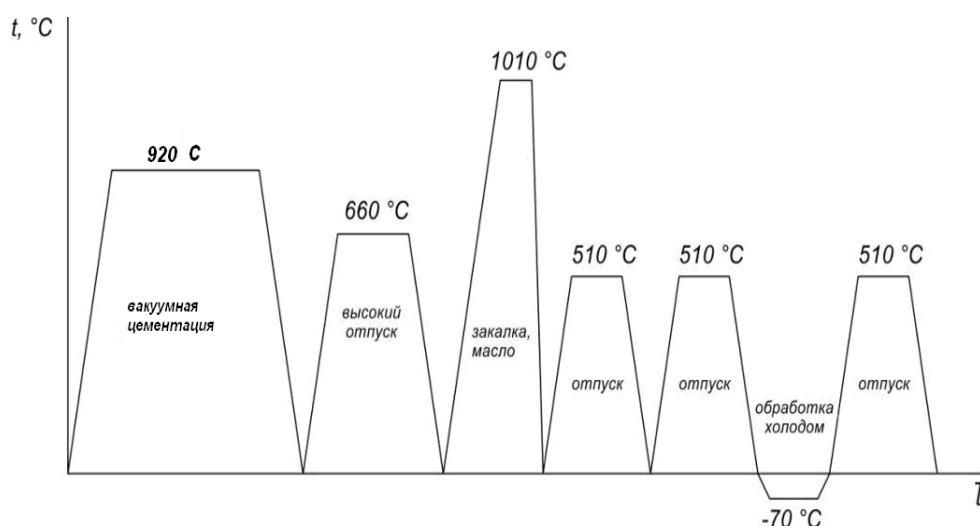


Рис. 1. Схема химико-термической и полной термической обработки стали ВКС-10

Исследовали образцы сталей как после вакуумной цементации и упрочняющей ТО, так и после вакуумной цементации, упрочняющей ТО и ионно-плазменного азотирования.

Металлографические исследования проводили на микроскопе Olympus GX-51 при увеличениях $\times 200$ и $\times 500$. Микрошлифы изготавливали по традиционной методике.

ДюрOMETрические исследования состояли в измерении твердости поверхности образцов по методу Роквелла на приборе TP5006-02 при нагрузке 150 кг и измерение микротвердости на приборе DuraScan при нагрузке 0,1 кг.

Эффективную толщину слоя определяли по результатам дюрOMETрического анализа на образцах, прошедших полный цикл упрочняющей термообработки. За эффективную толщину принимали расстояние от поверхности до точки с микротвердостью 500 HV0,1.

Для выявления микроструктуры образца использовали стандартный для сталей травитель – 3-4 % раствор азотной кислоты в этиловом спирте. Образцы протравливали наполовину (на протравленной половине проводили металлографические исследования, а на оставшейся – измеряли микротвердость).

Результаты исследований

Анализ результатов ВЦ, проведенный после упрочняющей ТО, показал, что при увеличении общего времени насыщения увеличивается не только эффективная толщина диффузионного слоя (рис. 2, а), но и твердость поверхности (рис. 2, в); при этом подтверждены литературные данные [2, 3] о параболической зависимости эффективной толщины слоя от общего времени насыщения.

В отличие от общего времени насыщения, соотношения времени активных и пассивных стадий цикла оказывает влияние в основном на приповерхностную часть диффузионного слоя, изменяя при этом твердость поверхности (рис. 2, г); эффективная толщина слоя при этом остаётся практически неизменной (рис. 2, б).

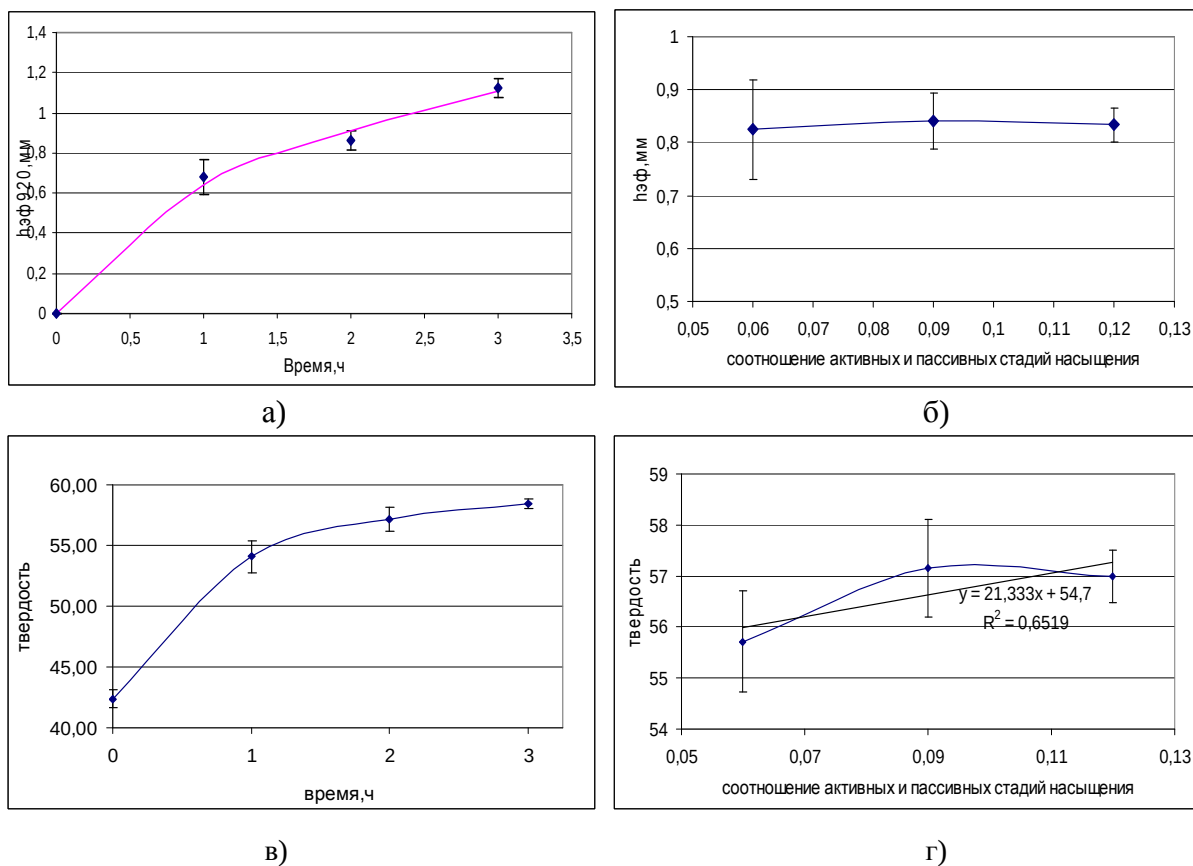


Рис. 2. Влияние времени насыщения (а, в) и соотношения времени активных и пассивных стадий цикла (б, г) на эффективную толщину слоя (а, б) и твердость поверхности (в, г) стали ВКС-10 после вакуумной цементации (920°C) и упрочняющей термообработки

Микроструктура стали после ВЦ, последующей упрочняющей ТО и шлифования (избыточные карбиды цементитного типа, мартенсит и дисперсные частицы специальных карбидов [4]) представлена на рис. 3.

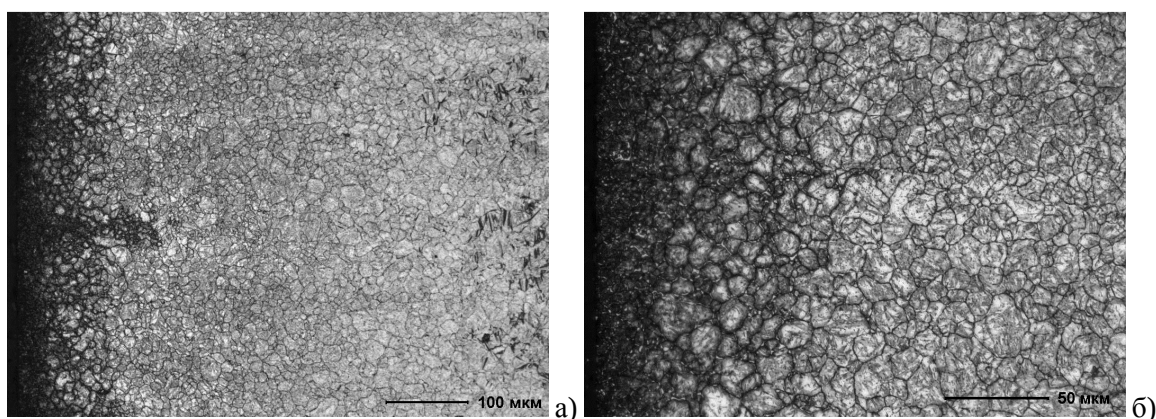


Рис. 3. Микроструктура стали ВКС-10 после ВЦ по режиму 920 °С, 2 часа, упрочняющей ТО и шлифования: а - $\times 200$; б - $\times 500$

При такой обработке формируется протяженный диффузионный слой (см. рис. 2, а, б), что способствует высокой контактной выносливости; при этом твердость поверхности имеет относительно невысокое значение (см. рис. 2, в, г).

Для дополнительного модифицирования поверхностного слоя применяли ионно-плазменное азотирование.

Здесь важно отметить, что температура ИА не превышает температуру последнего отпуска для стали ВКС-10 (см. рис. 1), что гарантирует отсутствие разупрочнения цементованного слоя и сердцевины при заключительном азотировании.

В процессе ионного азотирования происходит ряд процессов, связанных с насыщением поверхностного слоя азотом. Кроме насыщения твердого раствора азотом и образования нитридов легирующих элементов, происходит преобразование карбидов, сформировавшихся на этапе вакуумной цементации, в нитридные и карбонитридные фазы [5].

Микроструктура диффузионного слоя после ионно-плазменного азотирования представлена на рис. 4. Следует отметить, что при выбранном режиме азотирования на поверхности образца практически не образуется сплошной нитридный слой; названная структура обнаружена в виде отдельных фрагментов в периферийной части образца (рис. 5).

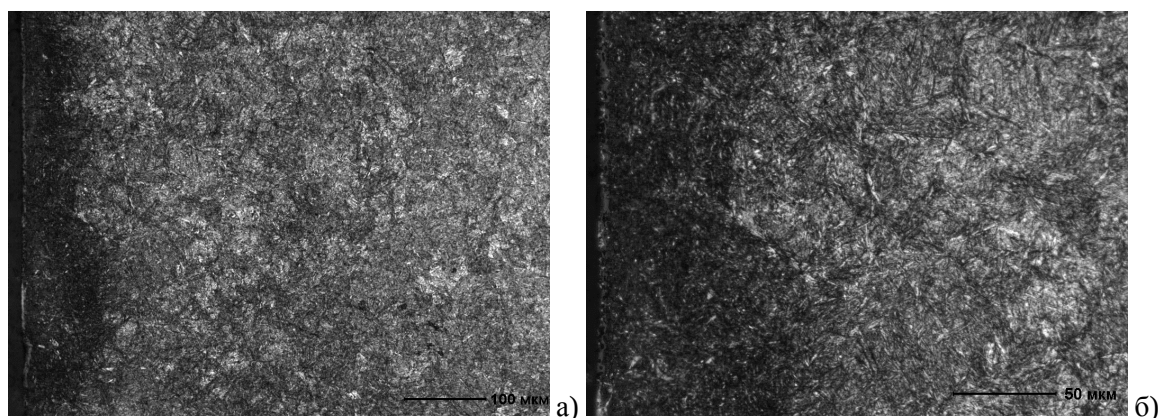


Рис. 4. Микроструктура стали ВКС-10 после ВЦ по режиму 920°C, последующей упрочняющей ТО, шлифования и ионно-плазменного азотирования по режиму 500°C: а - $\times 200$; б - $\times 500$

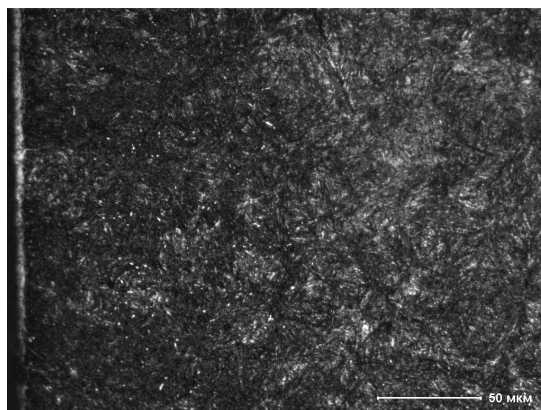


Рис. 5. Микроструктура стали ВКС-10 после ВЦ по режиму 920°C , последующей упрочняющей ТО , шлифования и ионно-плазменного азотирования по режиму 500°C ; периферийная часть образца: $\times 500$

Мартенсит, насыщенный не только углеродом, но и азотом, нитридные и карбонитридные фазы легирующих элементов, определяют повышенную твердость тонкого приповерхностного участка диффузионного слоя, полученного ВЦ. При этом не зафиксировано разупрочнение насыщенного углеродом слоя и сердцевины стали (рис. 6).

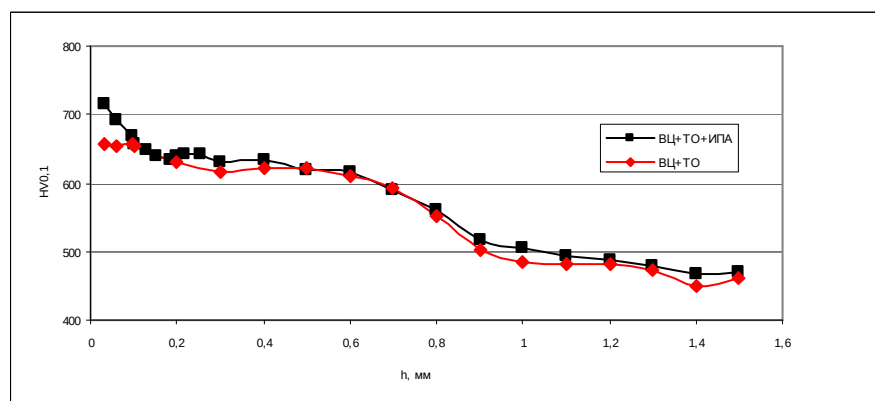


Рис. 6. Распределение микротвердости по толщине диффузионного слоя стали ВКС-10 после вакуумной цементации (920°C, 2 ч) и упрочняющей термообработки (1) и вакуумной цементации (920°C, 2 ч), упрочняющей термообработки и ионно-плазменного азотирования (500°C, 10 ч) (2)

Выводы

1. Установлена параболическая зависимость как эффективной толщины диффузионного слоя, так и твердости поверхности от общего времени насыщения; при этом соотношение времени активных и пассивных стадий цикла оказывает

влияние в основном на приповерхностную часть диффузионного слоя, практически не изменяя эффективную толщину слоя.

2. Высокотемпературная ХТО – вакуумная цементация в сочетании с последующей упрочняющей термической обработкой дают возможность получения протяженного диффузионного слоя с высокой несущей способностью, что способствует обеспечению высокой контактной выносливости обрабатываемых изделий.
3. Возможность осуществления низкотемпературной обработки определяется высокой температурой (510 °С) заключительного отпуска стали ВКС-10.
4. Проведение на заключительном этапе (после шлифования для устранения геометрических искажений) низкотемпературной ХТО – ионно-плазменного азотирования, формирует на поверхности протяженного цементованного слоя относительно тонкий (около 0,12 мм) высокотвердый модифицированный слой, что способствует получению высокой износостойкости и сопротивления схватыванию.

Список литературы

1. Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Нежурин И.П. Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей. М.: Высшая школа, 2001. 493 с.
2. Рыжов Н.М., Смирнов А.Е., Фахуртдинов Р.С. и др. Особенности вакуумной цементации теплостойкой стали в ацетилене // МиТОМ. 2004. № 6. С. 10-15.
3. Рыжов Н.М., Смирнов А.Е., Фахуртдинов Р.С. Управление насыщенностью углеродом диффузионного слоя при вакуумной цементации теплостойких сталей // МиТОМ.- 2004. № 8. С. 22-27.
4. Лашнев М.М., Семенов М.Ю., Смирнов А.Е. Применение вакуумной нитроцементации для повышения сопротивления схватыванию зубчатых колес из стали ВКС-10 // МиТОМ. 2013. № 1. С. 29-33.
5. Герасимов С.А. Научные основы разработки технологических процессов азотирования конструкционных легированных сталей, обеспечивающих повышение работоспособности изнашивающихся сопряжений машин: дисс. ... докт. техн. наук – М., 1997. 553 с.