

УДК 620.178

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ И КОНТАКТНАЯ ВЫНОСЛИВОСТЬ ТЕПЛОСТОЙКОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ РАЗНЫХ ВИДОВ ЦЕМЕНТАЦИИ

С.А. Пахомова¹, М.Ю. Рыжова²¹ кандидат технических наук, доцент, e-mail: mgtu2013@yandex.ru² ст. преподаватель, e-mail: vladisl-2013@yandex.ru^{1, 2} кафедра «Материаловедение», Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана, Россия

Аннотация. Сопротивление износу и контактной усталости имеет важное значение для многих узлов трения, включая зубчатые передачи. Особенно работающие при высоких окружных скоростях и удельных нагрузках в двигателях горнодобывающих машин.

Установлено, что способ цементации (газовая, ионная или вакуумная) оказывает значительное влияние на свойства. Предпочтительным является способ насыщения в тлеющем разряде.

Ключевые слова: зубчатые колеса, теплостойкие стали, газовая цементация, ионная цементация, вакуумная цементация, износостойкость, контактная выносливость.

WEAR RESISTANCE AND CONTACT FATIGUE OF HEAT-RESISTANT STEEL AFTER DIFFERENT KINDS OF CARBURIZING

S.A. Pakhomova¹, M. Ryzhova²¹Ph.D., assistant Professor, e-mail: dr.mgtu@yandex.ru² Senior Lecturer, e-mail: vladisl-2013@yandex.ru^{1, 2} Bauman Moscow State Technical University, Materials Department, Russia

Abstract. Resistance to wear and contact fatigue is important for many of friction units, including gears. Particularly operating at high peripheral speeds and specific loads in engines mining machinery.

It was found that the method of carburizing (gas, vacuum or ion) has a significant effect on the properties. The preferred method is saturation in the glow discharge.

Keywords: gear wheels, heat-resistant steel, gas carburizing, ion carburizing, vacuum carburizing, wear resistance, contact fatigue.

Введение. Повышенные требования к износостойкости характерны для цементованных зубьев колес шестеренчатых насосов двигателей горнодобывающих машин [1, 2]. Для них действует жесткое требование - износ рабочих поверхностей зубьев не должен превышать 0,1 мм, иначе резко падает производительность насоса. Изношенные поверхности головок и но-



жек зубьев содержат следы задира, множество царапин и борозд, свидетельствующих о преобладании двух механизмов скоростного изнашивания – адгезионного взаимодействия и микрорезания выступами микронеровностей и продуктами изнашивания в виде твердых абразивных частиц.

Соппротивление контактной усталости так же имеет важное значение для многих узлов трения, включая зубчатые передачи, работающие при высоких окружных скоростях и удельных нагрузках. В двигателях горнодобывающих машин к таким передачам относят зубчатые колеса центрального конического привода, окружная скорость которых составляет 140 м/с. Как указано в работе [3], при нарушении нормального режима работы (вибрации, концентрация нагрузки), возможен разрыв несущей пленки смазочного материала. В результате искажается эвольвентный профиль зуба, что служит причиной роста динамических нагрузок, увеличения опасности излома зуба.

Среди современных упрочняющих технологий, обеспечивающих требуемые эксплуатационные характеристики, широко известны методы электрохимической обработки [13]. Тем не менее центральное место принадлежит химико-термической обработке. В работах [5, 7, 8] показано, что цементацию следует сочетать с последующим деформационным упрочнением, проводимым в холодном или теплом режиме [10-12].

Цель работы - установить характер влияния параметров цементованного слоя и разных способов цементации на износостойкость и контактную выносливость теплостойкой стали, применяемой для тяжело нагруженных деталей.

Методика и объекты исследования. Объектами исследований служили роликовые образцы (диаметром 30,2 мм и шириной 18 мм) из стали 16ХЗНВФМБ-Ш (C = 0,19%; Cr = 2,9 %; Ni = 1,3 %; W = 1,2 %; V = 0,55 %; Nb = 0,15 %). Химический состав стали определяли методом микрорентгеноспектрального анализа на растровом электронном микроскопе «Camscan-IV» с микроанализатором «Inca».

Роликовые образцы подвергали газовой цементации (ГЦ), вакуумной цементации (ВЦ) и ионной цементации (ИЦ). Образцы проходили типичную для зубчатых колес ХТО: ГЦ, ВЦ, ИЦ при 930...950 °С, отпуск при 650 °С, закалку в масло от 910 °С, обработку холодом при – 70 °С, низкий отпуск при 280 °С и шлифование, которым удаляли припуск. ГЦ проводили в шахтной печи Ц-105 в атмосфере синтина. ИЦ проводилась в атмосфере ацетилен, разбавленного газовой смесью аргона с водородом [4]. ВЦ проводили на опытно-промышленной установке, оснащенной управляющим компьютером и системами автоматического регулирования технологических пара-

метров. Ацетилен подавали циклически в виде чередования активных стадий (τ_a), когда в рабочую камеру подавали цементационный газ, и пассивных (диффузионных) стадий (τ_n) при выключенной подаче газовой среды [6].

Время процесса было выбрано с таким расчетом, чтобы обеспечить насыщенность цементованного слоя той же степени, что и после газовой цементации.

Количественный анализ микроструктуры карбидной зоны выполняли на автоматическом анализаторе изображений «Квантимет-720». Распределение углерода по толщине диффузионного слоя оценивали спектральным методом на эмиссионном многоканальном спектрометре фирмы «Baird» с обработкой результатов в соответствии с ГОСТ 18895.

Твердость измеряли по методу Роквелла, регламентированному ГОСТ 9013, алмазным конусом с общей нагрузкой 150 кг.

Испытания на контактную выносливость проводили по схеме качения с проскальзыванием (6 %) по ГОСТ 25.501 на роликовой машине Ш17. В качестве смазочного материала использовали масло дизельного типа при температуре 175 ± 5 °С. За критерий долговечности принимали число циклов до образования выкрашивания на поверхности роликового образца размером не менее ширины рабочей дорожки, равной 8 мм.

Износостойкость цементованной поверхности оценивали путем испытаний образцов на машине «Шкода-Савин». Истирание участка поверхности выполняет диск из твердого сплава ВК6 диаметром 30 мм и шириной 5 мм. Скорость вращения диска составляла 500 об./мин., рабочая нагрузка 50 Н. Скорость изнашивания определяли как отношение объема вытертой лунки ко времени изнашивания, при котором глубина лунки достигала 0,1 мм.

Проведение экспериментов и их обсуждение. Различную насыщенность диффузионного слоя углеродом получали проведением двухстадийных режимов при ГЦ и ИЦ и циклических режимах при ВЦ, которые осуществляли при постоянной температуре, но со ступенчатым режимом подачи карбюризатора. Подобная технология устраняет пересыщение поверхности углеродом, снижает плотность карбидов, увеличивает эффективную толщину слоя [9].

Объемная доля карбидной фазы влияет на степень локализации микропластической деформации и уровень развития процессов релаксации локальных напряжений в мартенситной матрице под нагрузкой. Повышенная способность мартенситной матрицы к релаксации напряжений уменьшает опасность появления участков с критической концентрацией микродеформации и, следовательно, способствует несколько большему поглощению

энергии. Определено, что при ГЦ оптимальным является соотношение длительностей первой и второй стадии процесса газовой цементации 60 и 40 %. При этом доля избыточной карбидной фазы в диффузионном слое составляет ~ 15 %, а твердость поверхности ~ 62 HRC (табл. 1).

Таблица 1 - Контактная выносливость стали 16Х3НВФМБ-Ш после разных видов цементации

№ п/п	Режим ХТО	Объемная доля карбидов в слое 0...20 мкм	Твердость поверхности, HRC	Долговечность, $N \cdot 10^{-6}$ циклов
1	ГЦ - 2 стадии $t = 940^\circ$, $\tau_1=6$ ч, $\tau_2=4$ ч	17...18	62	16
2	ИЦ - 2 стадии $t = 950^\circ$, $\tau_1=2$ ч, $\tau_2=1,5$ ч	15...16	62...63	16,8
3	ВЦ (циклическая) $\Sigma\tau_a:\Sigma\tau_n = 1:1$; $t=940^\circ$, $\tau_{\text{общ}} = 6$ ч	17...20	61...62	26

При однотипных режимах ИЦ и ВЦ, распределение углерода в диффузионном слое, его структура и фазовый состав почти не отличаются от тех, которые характерны для ГЦ (рис. 1).

Необходимо особо отметить большую равномерность толщины диффузионного слоя по профилю деталей после ХТО в плазме тлеющего разряда.

Одинаковое структурное состояние стали после равнозначных режимов ГЦ и ИЦ обеспечивает одинаковое изменение структуры и свойств при испытаниях. Однако, при прочих равных условиях, несколько большая эффективность ВЦ и ИЦ обусловлена большей равномерностью распределения карбидной фазы в слое, так как при этом уменьшается опасность локализации напряжений в приграничных объемах.

ВЦ обеспечивает хорошо развитую карбидную зону с мелкими и равномерно распределенными частицами карбидов и, как следствие, плавным снижением твердости по толщине слоя. Для того чтобы сохранить насыщенность мартенсита легирующими элементами, доля частиц карбидной фазы при ВЦ является оптимальной (17...20 %). Этому значению соответствует концентрация углерода на рабочей поверхности в 1,3...1,5 % и твердость 61...62 HRC. Протяженность карбидной зоны составляет 0,4 мм и более, чтобы превышать на $\sim 0,2$ мм толщину припуска, удаляемого при зубошлифовании. Режимы с увеличенным временем диффузионной стадии, отношением стадий $\Sigma\tau_a:\Sigma\tau_n$, равным $\sim 1:1$ обеспечивают необходимую технологическую наследственность и высокую контактную выносливость (табл. 1).

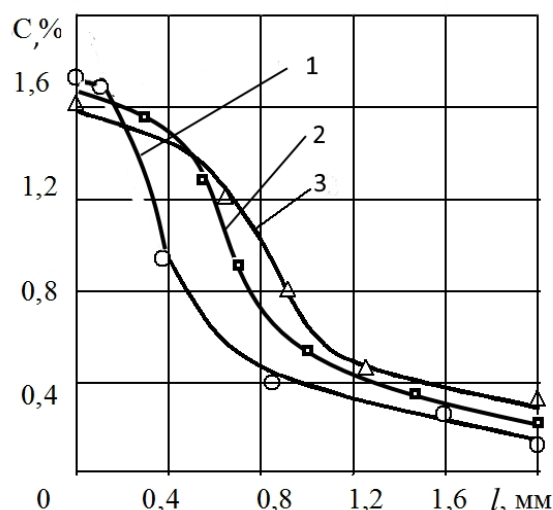


Рис. 1. – Распределение углерода С по толщине диффузионного слоя стали 16Х3НВФМБ-Ш, подвергнутой: 1 – ГЦ, 2 – ИЦ, 3 – ВЦ

Влияние параметров карбидной фазы на износостойкость цементованной поверхности характеризуют результаты испытаний образцов (рис. 2). Машина “Шкода-Савин” создает жесткие условия изнашивания - процесс микрорезания микронеровностями.

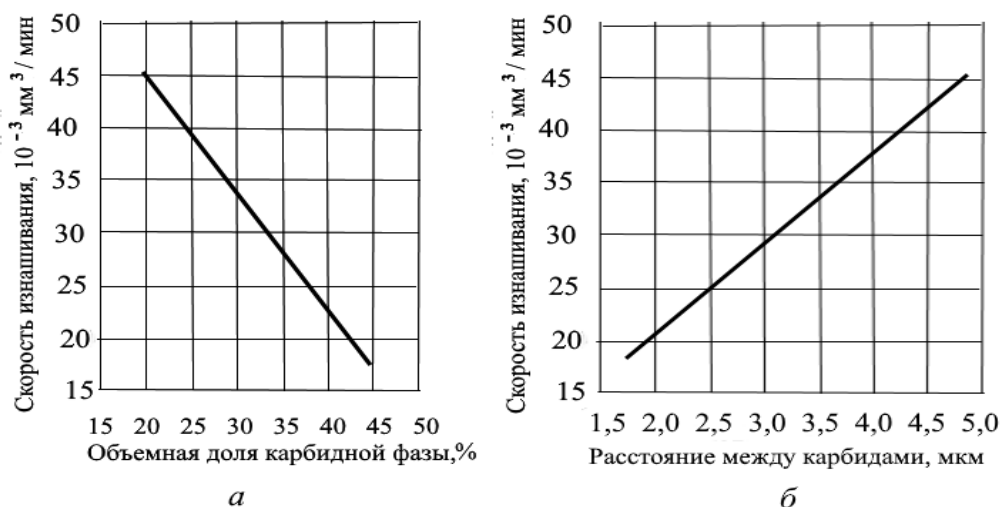


Рис. 2. – Зависимость скорости изнашивания от объемной доли V_k карбидной фазы (а) и расстояния ℓ между частицами карбидов (б) стали после ВЦ

Анализ полученных результатов подтверждает вывод о том, что уменьшение расстояния между карбидами при одновременном увеличении объемной доли карбидной фазы повышают сопротивление изнашиванию. Установлено, что увеличение объемной доли карбидной фазы на поверхности с 20 до 46 % об. и уменьшении расстояния между частицами карбидами с 4,2 до 1,5 мкм сопровождается в условиях микрорезания снижением скорости



изнашивания в 2,5 раза. Как видно из табл. 1, после всех видов цементации твердость поверхности достаточно высокая и меняется от 60 до 64 HRC.

Обработка в плазме тлеющего разряда позволяет не только в несколько раз сократить длительность выдержки и повысить уровень механических свойств, но и обеспечивает более равномерное науглероживание за счет точного повторения плазмой тлеющего разряда всех контуров детали. Исполнительные механизмы установок допускают быстрое изменение по ходу процесса температуры, давления, состава технологической атмосферы и создают условия для проведения различных комбинированных режимов диффузионного насыщения для создания слоя заданной насыщенности.

Применение рациональной технологии поверхностной обработки, учитывающей технологическую наследственность цементации (газовой, ионной и вакуумной), повышает эксплуатационные свойства рабочих поверхностей зубьев колес до 2,3 раза.

Выводы. 1. Контактная выносливость и износостойкость шестерен зависят от технологической наследственности цементации, которая проявляется через насыщенность цементованного слоя углеродом, объемную долю карбидной фазы, пластичность мартенсита, а также наличие остаточного аустенита. Способ цементации (газовая, ионная или вакуумная) оказывает значительное влияние на свойства.

2. Предпочтительным является способ насыщения в тлеющем разряде - ИЦ, отличающийся кроме ускорения цикла термического упрочнения более равномерным распределением карбидов в слое, возможностью управления процессом насыщения и стабильностью результатов.

3. ВЦ является перспективным способом обработки и обеспечивает высокие эксплуатационные свойства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Генкин М.Д., Рыжов М.А., Рыжов Н.М. Повышение надежности тяжело нагруженных зубчатых передач. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
2. Пахомова С.А. Особенности преподавания курса «инженерия поверхности» студентам по направлению «материаловедение и технологии материалов» // Инженерный вестник. 2015. № 9. С. 19.
3. Пахомова С.А., Макушина М.А., Коваленко С.В. Деформационное упрочнение тяжело нагруженных поверхностей зубчатых передач для горнодобывающей промышленности // Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта. 2016. № 3. С. 243-251.
4. Макушина М.А., Климкина А.А., Пахомова С.А. Исследование технологической наследственности разных способов цементации // В сборнике: Будущее науки 2016. Сборник научных статей 4й Международной молодежной научной конференции : в 4х томах. 2016. С. 86-89.

5. Pakhomova S.A., Ryzhov N.M., Vasil'ev V.R. Changes in the structure of martensite of iron-nickel alloys under the action of thermal shotblast treatment // Metal Science and Heat Treatment. 2001. Т. 43. № 11-12. С. 438-439.
6. Фахуртдинов Р.С., Рыжова М.Ю., Пахомова С.А. Преимущества вакуумной цементации и проблемы ее промышленного применения // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2016. № 8. С. 37-43.
7. Рыжов Н.М., Гуляев А.А., Пахомова С.А. Структура и контактная выносливость цементованной стали 12Х2Н4Ф после поверхностного пластического деформирования // Металловедение и термическая обработка металлов. 1986. № 3. С. 30.
8. Пахомова С.А. Совершенствование технологии поверхностного упрочнения шестерен из высокопрочных сталей // Тяжелое машиностроение. 2009. № 10. С. 35-38.
9. Pakhomova S.A., Unchikova M.V., Fakhurtdinov R.S. Gear wheels surface engineering by deformation hardening and carburization // Solid State Phenomena. 2016. Т. 870. С. 383-391.
10. Рыжов Н.М., Пахомова С.А. Эффективность теплового дробеударного упрочнения цементованных сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 1994. № 5. С. 21.
11. Пахомова С.А., Рыжов Н.М., Васильев В.Р. Изменение субструктуры мартенсита железоникелевых сплавов под воздействием тепловой дробеударной обработки / Металловедение и термическая обработка металлов. 2001. № 11. С. 29-31.
12. Пахомова С.А. Эффективность деформационного упрочнения теплостойких сталей // Деформация и разрушение материалов. 2007. № 1. С. 17-20.
13. Федорова Л.В., Федоров С.К., Иванова Ю.С., Сидоренко В.В. Отделочно-упрочняющая электромеханическая обработка стали 8620. Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. №8, С. 39-43.

УДК 621.314.57: 62.83

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОКА, ПОТРЕБЛЯЕМОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ

М.Ю. Пустоветов

кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетика, автоматика и системы коммуникаций», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: mgsn2006@yandex.ru

Аннотация. В работе проведено теоретическое исследование посредством математического моделирования на ЭВМ влияния параметров звена постоянного напряжения преобразователя частоты на величину потребляемого преобразователем тока. Рассмотрены преобразователи различной мощности.

Ключевые слова: преобразователь частоты, Г-образный фильтр звена постоянного напряжения, потребляемый ток, заряд.