

экспериментах *in vivo*. Так, прочность пленок возрастает, а относительное удлинение падает при увеличении АН. В то же время было установлено, что при повышении концентрации АН в пленках уровень спайкообразования у животных снижается.

1. Assietti, R. Use of carboxymethylcellulose/polyethylene oxide gel in microdissectomy with interlaminectomy: A case series comparison with long-term follow-up / R. Assietti, A. Mora, M. Brayda-Bruno // *Spine (Phila. Pa. 1976)*. – 2008. – Vol. 33, № 16 – P. 1762–1765
2. Канунникова, А.Р. Использование биodeградируемых плёнок на основе природных полисахаридов для предотвращения развития послеоперационного спайкообразования у крыс / А.Р. Канунникова, Ю.С. Просмыцкая // Молодежь в науке 2020: Тезисы XVII международной конференции молодых ученых (Минск, 22–25 сентября 2020 г.) / Национальная академия наук Беларуси; редкол.: В.Г. Гусаков [и др.]. – Минск, 2020. – С. 363–365.
3. Lagarrigue, S. The rheology of starch dispersions at high temperatures and high shear rates: A review / S. Lagarrigue, G. Alvarez // *J. Food Eng.* – 2001. – Vol. 50, № 4 – P. 189–202.

УСТАЛОСТНОЕ ИЗНАШИВАНИЕ СТАЛИ 16CRMNS5

А.В. Рабков¹, И.Н. Степанкин², Е.П. Поздняков¹,
Д.В. Куис³, А.Б. Найзабеков⁴, С.Н. Лежнев⁴

¹Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, Гомель, Беларусь; hanter3@gstu.by

²Белорусский научно-исследовательский институт нефти, Гомель, Беларусь

³Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

⁴Рудненский индустриальный институт, Рудный, Казахстан

Введение. В большинстве случаев эксплуатационные характеристики деталей машин и штамповой оснастки зависят от механических свойств их поверхности. В случае износостойкости главным параметром является твёрдость материала. Для её повышения применяют различные способы поверхностного упрочнения, среди которых наибольшее распространение в промышленности связано с изменением количества углерода — цементация и нитроцементация. В качестве упрочняемых материалов традиционно используют низкоуглеродистые стали марок 18ХГТ, 12ХНЗА, 20Х, 20Х2Н4А и др. [1, 2]. В настоящее время на ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга БМК» проводится плавка марки стали 16CrMnS5 в соответствии с DIN EN 10084, экспортируемой в Европейский Союз. Однако на территории СНГ и ближнего зарубежья она не получила широкого распространения из-за малой информативности о ее свойствах. Поэтому актуальным является вопрос исследования влияния фазовых составляющих на свойства поверхностно-модифицированных слоёв стали 16CrMnS5 для последующего сравнения с известными сплавами.

Материалы и методы исследования. В качестве материала для исследований выбрана сталь 16CrMnS5 с термодиффузионно-упрочнёнными слоями. Диффузионное насыщение сплава осуществлялось путем проведения цементации при температуре 920 °С в течение 8-ми и 12-ти часов и нитроцементации при температуре 860 °С в течение 6 и 8 часов в твердом карбюризаторе. После ХТО проводилась закалка в масле с температуры 860 °С и отпуск при 200 °С в течение 1 часа. Интенсивность накопления усталостных повреждений в поверхностном слое при многократном контактом воздействии на материал исследовали на установке для испытаний на контактную усталость и износ [3]. Испытания проводились при амплитуде контактных напряжений 950 МПа с достижением предельного износа 0,6 мм.

Результаты и их обсуждение. Микроструктура цементованных слоёв состоит из мартенсита, аустенита и карбидов. Объёмное количество последних составило 18 % и 26 % после 8-ми до 12-ти часов насыщения соответственно. Их максимальный размер достиг 20 мкм. Микротвёрдость поверхности слоёв составила 7000—7500 МПа при общей толщине 1,9—2,1 мм. Микроструктура нитроцементованных слоев ожидаемо отличается от цементованных. Структура слоя, сформированного после 6-ти часовой нитроцементации, состоит из мартенсита и остаточного аустенита, а после увеличения длительности ХТО до 8-ми часов в поверхностном слое обнаружены мелкодисперсные включения предположительно карбонитридного типа с максимальным размером не более 5 мкм. Микротвёрдость поверхности нитроцементованных слоев оказалась близкой к цементованным — 6950—7500 МПа. Главным отличием нитроцементованных слоёв от цементованных оказалось снижение их общей толщины примерно в 2 раза — до 1,0—1,1 мм.

На рис. 1 приведён график зависимости износа термодиффузионно-упрочнённых слоёв стали 16CrMnS5 от числа циклов нагружения. Анализ кривых показал, что зависимости износа всех слоёв имеют близкое распределение с тремя этапами изнашивания. На первом этапе, длительностью 1000—1500 циклов, происходит приработка контактирующих поверхностей образцов и контртела. Уже на данной стадии протекает образование наклёпа с формированием мелких частиц на контактной поверхности образцов. Второй этап отличается высокой износостойкостью всех слоёв. Процесс образования мелких частиц деформированного материала с последующим их удалением продолжается. Максимальной износостойкостью обладают образцы после 6-ти часовой нитроцементации (19360 циклов), а

минимальной — после 12-ти часовой цементации (15040 циклов). Глубина лунки износа для всех партий образцов не превысила 0,05 мм. На третьем этапе интенсивность изнашивания повышается. В процессе увеличения наработки формирующиеся трещины контактной усталости растут, образуя питтинги. Их появление провоцирует уменьшение площади контакта с увеличением напряжений. Предельный износ науглероженные образцы достигли при 39—40 тысяч циклов нагружения. Отличительной особенностью нитроцементованных образцов является аномально высокая скорость изнашивания при достижении лунки износа порядка 0,4 мм (~ 32 тысячи циклов). Это связано с резким снижением микротвёрдости до 5500 МПа на глубине около 0,6 мм, после превышения которой материал имеет низкую способность сопротивляться воздействию контактных нагрузок при данных напряжениях.

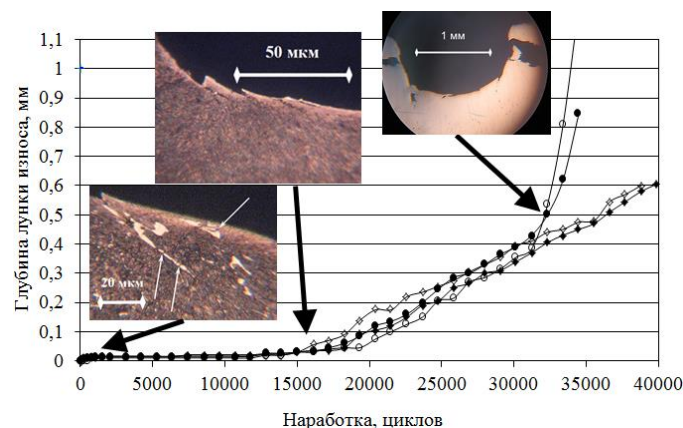


Рис. 1. Зависимости износа термодиффузионно-упрочненных слоёв стали 16CrMnS5:
 ◆ — 8-ми и ◇ — 12-ти часовая цементация; ○ — 6-ти и ● — 8-ми часовая нитроцементация

Заключение. При контактных напряжениях 950 МПа высокой износостойкостью при достижении износа не более 0,05 мм обладают все исследованные слои — от 15040 до 19360 циклов нагружения. Вследствие формирования мелких частиц на контактной поверхности образцов протекает их постепенное удаление, что, в конечном итоге, провоцирует образование и рост трещин контактной усталости в более глубоких слоях материала. Удаление более крупных частиц приводит к образованию питтингов, что уменьшает контактную площадь поверхности и возрастание действующих напряжений. В результате износ сплава интенсифицируется. Максимальной износостойкостью обладают цементованные слои, которые достигли предельного износа (0,6 мм) при 39—40 тыс. циклов нагружения;

Низкая стойкость нитроцементованных образцов при достижении глубины лунки износа порядка 0,4 мм связана с резким снижением твёрдости материала. Для деталей машин, у которых допустимый износ поверхности превышает 0,4 мм, нитроцементацию проводить не рекомендуется.

1. Лахтин, Ю.М. Химико-термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин, Б.Н. Арзамасов. — М.: Металлургия, 1985. — 256 с.
2. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / Г.В. Борисенко [и др.]. — М.: Металлургия, 1981. — 424 с.
3. Устройство для испытания на контактную усталость и износ: пат. ВУ 7093 / И.Н. Степанкин, В.М. Кенько, И.А. Панкратов. — Оpubл. 28.02.2011.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ PH СРЕДЫ НА СКОРОСТЬ ЭРОЗИОННО-КОРРОЗИОННОГО ИЗНАШИВАНИЯ

Е.О. Решиков¹, С.В. Чернышов¹, П.П. Бесшапов², М.В. Прожега^{1, а}

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН),
 Москва, Россия;

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия; ^аmaksim.prozhega@yandex.ru

Введение. Эрозионно-коррозионному изнашиванию подвержены элементы систем очистки сточных вод, а также механизмы, работающие в потоке агрессивных жидкостей, которые встречаются в различных отраслях промышленности [3, 6].

Исследования эрозионно-коррозионного изнашивания в основном проводят в отсутствие в составе жидкости абразивных частиц, поскольку испытания с абразивом представляют определенные методологические и технические трудности [3].

В работе [5] проведены исследования стойкости к эрозионно-коррозионному изнашиванию покрытий на