

ТИМОФЕЕВ С. С., доктор технических наук, профессор кафедры качества, стандартизации, сертификации и технологий изготовления материалов (Украинский государственный университет железнодорожного транспорта)

## Способы и методы модификации поверхностей трения

*В статье анализируется опыт применения различных способов и методов повышения качества поверхностных слоёв триботехнических соединений. Определено, что каждый из них имеет свои достоинства и недостатки. Установлено, что для повышения качественных параметров поверхностного слоя триботехнических соединений может быть использован комплексный метод, который бы включал в себя известные способы обработки, сочетая их достоинства, а во многих случаях превосходил бы их.*

**Ключевые слова:** триботехнические соединения, поверхностный слой, модифицирование, износостойкость, комплексный метод.

### Постановка проблемы

Для восстановления работоспособности деталей пар трения перспективными являются такие технологические способы восстановления, которые позволили бы снизить количество технологических операций с формированием рабочей поверхности с заданными эксплуатационными свойствами. Наиболее перспективной в этом отношении является комплексная обработка, которая обеспечит получение поверхностного слоя деталей триботехнических соединений с заданными физико-механическими свойствами.

Основной задачей применяемых методов модификации поверхностей трения является повышение качественных параметров поверхностного слоя: повышение твёрдости и микротвёрдости, снижение шероховатости, повышение износостойкости и восстановления изношенных участков поверхностей, изменение величины и знака остаточных напряжений, увеличение усталостной прочности и т.п.

**Цель статьи.** На основе проведенных исследований обосновать перспективу применения комплексного метода модификации поверхностей

трения триботехнических соединений для получения заданных эксплуатационных свойств.

### Основной материал исследования

В последнее время широкое распространение получил процесс азотирования ионизированным азотом в плазме тлеющего разряда – ионное азотирование (ИА). Способ ИА заключается в обработке детали или инструмента потоком ионов азота. В результате последние проникают на контролируемую глубину до 1 мм.

В табл. 1 показаны режимы и основные параметры качества сформированных поверхностных слоёв после ИА. Недостатками метода являются: снижение шероховатости поверхности, возникновение в поверхностном слое растягивающих остаточных напряжений, снижение усталостной прочности.

Одним из перспективных способов повышения износостойкости прецизионных пар является способ конденсации при ионной бомбардировке (КИБ) который реализуется с помощью пламенных ускорителей и электродуговых испарителей, принцип действия которых основан на едином методе генерации вещества.

Таблица 1

Режимы и результаты ИА типовых деталей из различных сталей

Материал детали	Температура °С	Время, ч	Микротвёрдость, МПа	Глубина слоя, мкм	Остаточные напряжения, МПа	Типовые детали
40Х13	520	10	11000	140	-450	Пресс-формы, клапаны и др.
38Х2МЮА	530	5-6	10500	280	-400	Штоки, гильзы, втулки и др.
40Х	520	4-5	5500	200	-350	Валы, зубчатые колеса
40ХФА	520	4-5	6000	200	-350	Плунжера, втулки
18Х2Н4МА	550	7	6500	350	-450	Коленчатые валы, шатуны
18ХГТ	550	3-4	5500-6000	200	-350	Шестерни
12Х18Н10Т	560	5	10000	170	-200	Детали арматуры, клапаны и др.

Электродуговые испарители и пламенные ускорители наиболее эффективны при работе на тугоплавких материалах. В этом случае степень ионизации пламенного потока близка к 100%. Технологическая сущность КИБ состоит в пламенно-химическом синтезе вещества покрытия вблизи упрочняемой поверхности (или непосредственно за ней) и конденсации на ней продуктов этого синтеза. Процесс нанесения покрытия методом КИБ можно условно разделить на три стадии: первая – генерация плазмы одного из компонентов покрытия (металлического материала); вторая – чистка и активация покрываемой поверхности потоком этой плазмы (ионная бомбардировка) и третья – синтез с помощью газа реагента износостойкого покрытия и осаждения его на упрочняемой поверхности [1].

Материал катода (напыляемый материал) испаряется в виде высокоскоростных струй (скорость  $1 \times 10^6$  см/с), содержащих как заряженные, так и нейтральные частицы. Струи представляют собой пламенные потоки атомов и ионов с высокой степенью ионизации. Деталь (анод) помещают на пути пламенных потоков. На неё подают отрицательный потенциал, ускоряющий поток ионов. Выбитые из катода атомы разгоняются до высоких энергий. Они с большой скоростью бомбардируют поверхность анода, очищают её, внедряются в кристаллические решётки поверхностного слоя и, накапливаясь, образуют на поверхности микроплёнку осаждаемого (конденсируемого) вещества. Способ позволяет создавать металлические износостойкие покрытия, состоящие из химических соединений – карбидов, нитридов, оксидов, карбонитридов тугоплавких металлов Ti, Mo, Cr, W, V и др., а также многослойные и многосоставные (композиционные) покрытия. Толщина покрытия 5–20 мкм. Преимущества способа в сравнении с методами химико-термической обработки: возможность получения на рабочих поверхностях износостойкого покрытия высокой микротвёрдости (HV 2600 – 3800); более высокая производительность процесса: возможность проведения процесса при температурах, не превышающих температуру отпуска, ранее термообработанных изделий; значительное повышение износо-, жаро- и коррозионной стойкости покрытий. Недостатки метода: возможность упрочнения изделий ограничена размерами камеры, малая толщина наносимых слоёв ограничивает восстановление изделий. Высокая плотность изделия энергии, простота управления параметрами процесса, бесконтактность и высокая скорость обработки, а также возможность передачи энергии на большие расстояния являются теми характеристиками лазерной обработки, которые вызывают к себе пристальное внимание исследователей и технологов.

Лазерное термоупрочнение поверхности детали является перспективным процессом, создающим ряд

возможностей повышения эксплуатационных качеств деталей и инструмента. Метод основан на использовании явления высокоскоростного разогрева металла под действием лазерного луча до температур, превышающих температуру фазовых превращений АС<sub>1</sub>, но ниже температуры плавления и последующего высокоскоростного охлаждения за счёт отвода тепла с поверхности в основную массу металла. При обработке лучом лазера, как и при обычной закалке, в поверхностном слое образуется мартенсит и остаточный аустенит. Микротвёрдость в зоне обработки повышается за счёт того, что в зоне быстрого нагрева и охлаждения образуется более мелкозернистый мартенсит. Глубина упрочнённого слоя достигает 0,2 мм. Шероховатость после лазерной обработки не изменяется. К преимуществам можно отнести: возможность высокопроизводительного упрочнения локальных участков деталей в местах их интенсивного износа, при небольшой глубине воздействия и с сохранением исходных свойств материала, при небольшой глубине воздействия и с сохранением исходных свойств материала в основном объёме (высокая твёрдость обработанной лазерным излучением поверхности детали – примерно на 20% выше твёрдости при термообработке по традиционной технологии – и обусловленная этим высокая износостойкость); возможность упрочнения труднодоступных участков деталей путём введения луча лазера через окна и отверстия; отсутствия деформации детали и возможность обработки без увеличения шероховатости, что создаёт возможность исключить финишную обработку. Лазерной обработкой можно и упрочнять детали [2, 3]. Недостатки метода: невозможность восстановления размеров изношенных участков изделий, низкая производительность упрочнения больших площадей поверхности, в отдельных случаях необходимость в сложной оснастке.

Поверхностное пластическое деформирование (ППД), основанное на механическом методе исходного упрочнения, выполняется с целью повышения сопротивления усталости и твёрдости поверхностного слоя металла и формирования в нём направленных внутренних напряжений, преимущественно напряжений сжатия, также регламентированного рельефа микронеровностей на поверхности. Наклёп поверхностного слоя металла способствует повышению износостойкости деталей, уменьшает смятие и истирание поверхностей при наличии и непосредственного контакта, и взаимное внедрение поверхностных слоёв, возникающее при их механическом и молекулярном взаимодействии. Среди различных способов ППД различают: дробеструйную обработку, чеканку, поверхностное обкатывание (раскатывание) роликом и шариком, выглаживание, виброобработка, упрочняющее точение, поверхностное

дернование. Способы механического ППД деталей имеет следующие преимущества перед другими: малая трудоёмкость, простота технологии (не требуются значительные затраты на оборудование и оснастку), возможность упрочнения деталей любой формы и размеров, возможность изменения глубины упрочнения, достаточно высокая твёрдость упрочнённых слоёв.

С помощью ППД можно создавать специальные упрочняющие микрорельефы в поверхностях. Наиболее простым и эффективным методами отделочно-упрочняющей обработки является обкатка шариком (ОШ), обкатка роликом (ОР) и алмазное выглаживание (АВ). При обработке незакалённых сплавов и сталей применяют ОШ ОР, а для высокопрочных закалённых сталей и сплавов более эффективным является АВ. Глубина распространения пластической деформации при обкатывании и выглаживании определяется механическими свойствами и структурой стали. Кроме того, глубина наклёпа зависит от размера контактной площади. С возрастанием давления глубина наклёпанного слоя возрастает. При одинаковых давлениях глубина проникновения ППД тем больше, чем ниже предел

текучести материала. При АВ, несмотря на более высокий прирост поверхностной твёрдости, пластичная деформация распространяется на меньшую глубину и наклёпанный слой у выглаженных образцов значительно тоньше, чем у обкатанных. Глубина упрочнённого ППД слоя может достигать нескольких миллиметров. В результате наклёпа повышаются все характеристики сопротивления металла деформации, понижается его пластичность и увеличивается твёрдость. Упрочнения металла в незакалённой стали происходит за счёт структурных изменений и изменений структурных несовершенств (плотности, качества и взаимодействия дислокаций, количества вакансий и др.), дроблением блоком и наведением микронапряжений. При упрочнении закалённых сталей, помимо этого, происходит частичное превращение остаточного аустенита в мартенсит и выделение дисперсных карбидных частиц [3]. Таким образом, следует отметить, что в настоящее время существует большое количество различных методов повышения качества поверхностных слоёв изделий, каждый из них имеет свои достоинства и недостатки (табл. 2).

Таблица 2

**Достоинства и недостатки технологических способов повышения качества поверхностных слоёв изделий**

Характеристика качества поверхностного слоя	Наименование методов повышения качества поверхностного слоя
1	2
<b>Достоинства</b>	
Повышение твердости	Закалка ТВЧ, цементация, азотирование, ИА, цианирование, борирование, термодиффузионное хромирование, КИБ, ЛО, ППД, наплавка, гальванопокрытия, металлизация напылением.
Снижение твердости	ЛО
Отсутствие коробления	КИБ, ЛО, гальванопокрытия
Повышение жаростойкости	Борирование
Повышение износостойкости	Закалка ТВЧ, цементация, азотирование, ИА, цианирование, борирование, термодиффузионное хромирование, КИБ, ЛО, ППД, гальванопокрытия
Возможность упрочнения в локальных местах	ЛО
Возможность восстановления износостойких поверхностей	Наплавка, гальванопокрытия, металлизация напылением, КИБ
Возможность нанесения на упрочняемую поверхность чистых металлов, металлокерамических композиций, тугоплавких соединений и т.п.	КИБ
Создание на рабочей поверхности переходных слоев определенной шероховатости	Комплексные методы
Повышение усталостной прочности	Закалка ТВЧ, цементация, азотирование, ИА, цианирование, борирование, термодиффузионное хромирование, КИБ, ЛО, ППД
Снижение шероховатости	ЛО, ППД

Продолжение таблицы 2

Недостатки	
1	2
Коробление	Закалка ТВЧ, цементация, азотирование, ИА, цианирование, борирование, термодиффузионное хромирование, наплавка, гальванопокрытия, металлизация напылением
Увеличение шероховатости	Наплавка, гальванопокрытия, металлизация напылением
Снижение усталостной прочности	Наплавка, гальванопокрытия, металлизация напылением
Невозможность упрочнения крупногабаритных деталей	КИБ, ЛО
Невозможность восстановления изношенных поверхностей	Закалка ТВЧ, цементация, азотирование, ИА, цианирование, борирование, термодиффузионное хромирование, ЛО
Невозможность восстановления изношенных поверхностей	Закалка ТВЧ, цементация, азотирование, ИА, цианирование, борирование, термодиффузионное хромирование, ЛО
Повышенная экологическая опасность	Цементация, азотирование, цианирование, борирование, термодиффузионное хромирование, наплавка, гальванопокрытия, металлизация напылением

**Выводы**

Проведённые исследования позволили, обосновано, из всех рассмотренных методов повышения качества поверхностных слоёв изделий выделить, как наиболее перспективный, комплексный метод, который бы включал в себя известные упомянутые способы обработки, сочетая их достоинства, а во многих случаях превосходил бы их.

**Литература**

1. Ляшенко Б.А., Клименко С.А. Развитие упрочняющей обработки – путь повышения работоспособности техники // Тез. докл. межд. научн.-техн. конф. Надёжность машин, механизмов, оборудования. – Карпаты, п. Славское. – 2000. – С. 74–77.
2. Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.
3. Минкевич А.Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. – М.: Машиностроение, 1965. – 492 с.

**Тимофеев С.С. Способи і методи модифікації поверхонь тертя.** У статті аналізується досвід застосування різних способів і методів підвищення якості поверхневих шарів триботехнічних з'єднань. Визначено, що кожен з них має свої переваги і недоліки. Встановлено, що для підвищення якісних параметрів поверхневого шару триботехнічних з'єднань може бути використано комплексний метод, який би включав в себе відомі способи обробки, поєднуючи їх гідності, а в багатьох випадках перевершував би їх.

**Ключові слова:** триботехнічні з'єднання, поверхневий шар, модифікація, зносостійкість, комплексний метод.

**Timofeyev S. S. Techniques and methods for the modification of friction surfaces.** Such technological restoration methods, which would reduce the number of processing steps concerning the formation of a working surface with specified service properties, are perspective for the restoration of friction pair parts working capacity. The most promising is complex processing, which will allow obtaining of the surface layer of tribotechnical compound parts with specified physical and mechanical properties. The main objective of the methods of friction surfaces modification is to increase the quality parameters of the surface layer.

The application experience of different ways and methods to improve the quality of tribotechnical compound surface layers is analyzed in the article.

It has been determined that each of them has its advantages and disadvantages. It has been found that a complex method which would include the known processing methods, combining their advantages, and in many cases excelling them, can be used to improve the quality parameters of tribotechnical compound surface layer.

**Key words:** tribotechnical compound, surface layer, modification, wear resistance, complex method.

Рецензент д.т.н., професор Геворкян Е.С. (УкрДУЗТ)

Поступила 13.05.2015

**Тимофеев С.С.,** доктор технічних наук, професор кафедри якості, стандартизації, сертифікації та технологій виготовлення матеріалів Українського державного університету залізничного транспорту, Харків, Україна.

**Timofeyev S.S.,** Doctor of engineering, professor department of quality, standardization, certification and production technology of materials, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.