

## Исследование свойств поверхностного слоя покрытия, полученного методом азотирования с последующей ультразвуковой упрочняющей обработкой

И.В. Данилин, С.К. Сундуков,\* Д.С. Фатюхин

*Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),  
кафедра «Технология конструкционных материалов»,  
лаборатория электрофизических методов обработки,  
Россия, 125319, Москва, Ленинградский проспект, д. 64*  
(Статья поступила 06.11.2014; Подписана в печать 28.11.2014)

Твёрдость стали является одним из важнейших свойств, определяющих её износостойкость. Для повышения твёрдости применяются технологии поверхностного упрочнения: азотирование и поверхностно-пластическое деформирование, которые основаны на принципиально разных процессах. Применение комбинированного метода позволяет повысить твёрдость поверхностного слоя материала и увеличить глубину упрочнения. В данной работе приведены результаты исследований свойств покрытия, полученного методом азотирования с последующей ультразвуковой упрочняющей обработкой.

PACS: 62.30.+d      УДК: 534-8

Ключевые слова: твёрдость, прочность, азотирование, ультразвуковая обработка.

### ВВЕДЕНИЕ

Состояние поверхностного слоя определяет эксплуатационные свойства деталей машин и механизмов. Поэтому повышение эффективности технологий поверхностного упрочнения является перспективным направлением научных исследований.

Известно, что повышение эксплуатационных свойств деталей, из которых одним из важнейших является твёрдость, может быть достигнуто в результате проведения химико-термической обработки или методами поверхностно-пластического деформирования (ППД).

Одним из распространённых способов целенаправленного модифицирования стальных поверхностей является азотирование – метод повышения твёрдости, износостойкости, коррозионной стойкости и предела выносливости. Сущность метода заключается в выдержке азотируемой детали в атмосфере диссоциированного аммиака при повышенных температурах. В этих условиях протекает реакция  $2\text{NH}_3 > 3\text{H}_2 + 2\text{N}$ , при этом образующийся атомарный азот диффундирует в металл.

Недостатками способа являются:

- малая толщина получаемого слоя,
- значительная разница в твёрдости азотированного слоя и основного металла,
- сложности получения высокой твёрдости при азотировании низкоуглеродистых сталей.

Одним из наиболее эффективных способов ППД является ультразвуковой.

При обработке между поверхностью и инструментом возникает периодический контакт с частотой ультразвуковых колебаний. Пластическое деформирование возникает на счет превышения мгновенных напряжений в момент контакта над средними напряжениями. Одновременно с пластическим деформированием увеличивается плотность дислокаций, что ведет к увеличению твердости.

При ультразвуковой обработке на поверхности детали образуются регулярно чередующиеся микроуглубления — отпечатки поверхности инструмента, которые способствуют лучшему удерживанию смазки на поверхности, что приводит к повышению износостойкости. По сравнению с азотированием ультразвуковое ППД позволяет получить больший по глубине наклёпанный слой, но при этом повышение микротвёрдости не так велико.

При реализации рассмотренных способов изменение эксплуатационных свойств деталей происходит в результате принципиально разных процессов: при азотировании — образование соединений железа и азота в поверхностном слое, а при ультразвуковом ППД — возникновение остаточных сжимающих напряжений в наклёпанном слое. Очевидно, что применение комплексного воздействия, включающего в себя азотирование и ультразвуковое ППД, должно давать качественно новые результаты.

### 1. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В лаборатории электрофизических методов обработки МАДИ проведены экспериментальные исследования по влиянию комбинированного метода упрочнения на свойства и структуру поверхностного слоя. В качестве испытуемых образцов использовались пластины 20x20x10 мм из стали Ст3. Для измерений подготовлено четыре группы образцов: 1 — образцы без обработ-

\*E-mail: sergey-lefmo@yandex.ru

ки, 2 — азотированные образцы, 3 — образцы, подвергнутые ультразвуковому ППД, 4 — азотированные образцы с последующей ультразвуковой обработкой. Выбор последовательности для получения образцов 4-й группы обусловлен высокой температурой азотирования, которая приводит к рекристаллизации и снятию эффекта наклёпа при использовании последовательности «ППД + азотирование».

Процесс азотирования осуществлялся на установке (рис. 1).



Рис. 1: Установка для азотирования поверхности деталей

Режимы обработки указаны в табл. 1.

Таблица 1: Параметры режима азотирования

Режим азотирования	Изотермический
Состав насыщающей среды	50% $\text{NH}_3$ + 50% воздуха
Продолжительность азотирования	1 час
Температура насыщения	550 °C

С целью обеспечения чистоты проведения эксперимента перед азотированием образцы подвергались нор-

мализации для придания им однородной структуры. Далее образцы обезжиривались и помещались в кассету, а далее в контейнер, который плотно и герметично закрывался. Контейнер обдувался аммиаком не менее 15 мин, после чего диссоциометром измерялось его остаточное содержание. При показателе менее 90%, продувка продолжалась. После достижения требуемого условия контейнер погружался в печь, устанавливалась температура изотермической выдержки и включался нагрев.

При достижении температуры изотермической выдержки в соответствии с нормативами задавался азотный потенциал насыщающей атмосферы (на задатчике устройства). Также измерялась степень диссоциации аммиака. По окончании процесса контейнер извлекался из печи, а при достижении температуры 100°C отключалась аммиачная магистраль. Далее контейнер продувался воздухом, открывался и детали вынимались.

Ультразвуковое ППД осуществлялось по схеме (рис. 2).

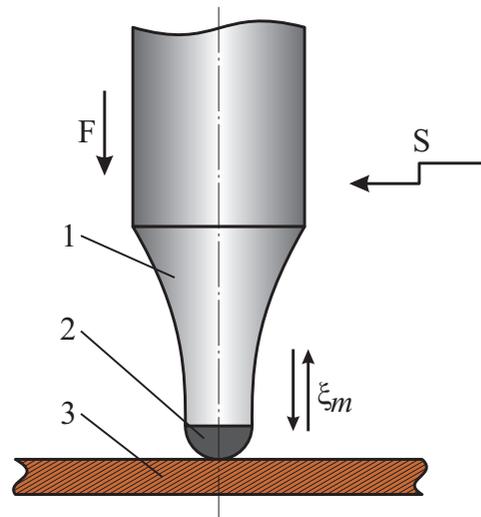


Рис. 2: Схема ультразвукового ППД: 1 — излучатель колебательной системы, 2 — индентор (шарик), 3 — обрабатываемая поверхность

В процессе обработки инструмент прижимался к обрабатываемой детали с силой  $F$ . Амплитуда колебаний  $\xi_m$  поляризована в плоскости перпендикулярной упрочняемой поверхности, инструмент осуществляет возвратно-поступательные движения со скоростью  $S$ . Качество процесса ППД также зависит от диаметра индентора  $d$ , и частоты колебаний  $f$ . Оптимальные параметры обработки для Ст3 представлены в табл. 2 [1].

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

У полученных групп образцов измерялись: микротвёрдость на поверхности, распределение микротвёрдо-

Таблица II: Параметры режима ультразвукового ППД

Параметр	Обозначение	Значение
Амплитуда колебаний	$\xi_m$	15 мкм
Частота колебаний	$f$	22 кГц
Усилие прижима	$F$	100 Н
Подача	$S$	3 м/мин
Диаметр индентора	$d$	8 мм

сти по глубине, а также оценивалась структура упрочнённого слоя.

На рис. 3 представлены результаты измерения твёрдости на поверхности и глубины упрочнения (по достижению твёрдости основного материала).

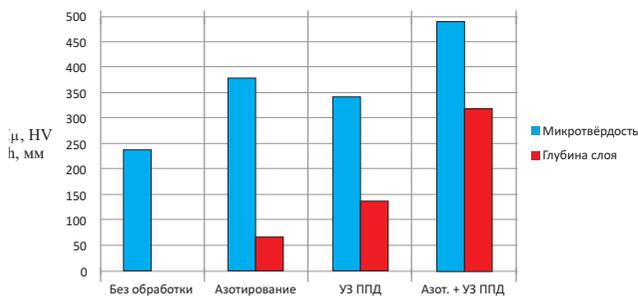


Рис. 3: Изменение твёрдости поверхностного слоя и глубины упрочнения в зависимости от вида обработки

Наибольший эффект по повышению твёрдости, а также по глубине упрочнения достигнут при применении комбинированного метода обработки. При этом по сравнению с не комбинированными методами твёрдость увеличивается до 1,5 раз, а глубина увеличивается в 3–6 раз. Возрастание твёрдости объясняется ультразвуковым упрочнением азотированного слоя, а увеличение глубины связано с повышением эффективности передачи и распределения ударной нагрузки от ультразвукового инструмента за счёт высокой твёрдости азотированного слоя, который является промежуточным элементом между индентором и основным металлом.

Поверхностный слой образца, полученного комбинированным методом, характеризуется наличием четырёх зон (рис. 4). Первая зона — азотированный слой, вторая — диффузионный слой, 3 — деформированный слой, 4 — основной материал. У поверхностного слоя, полученного азотированием, отсутствует третья зона, а у поверхностный слой, полученный только ППД, состоит из третьей и четвёртой зоны.

Таким образом, предлагаемый способ упрочнения не только позволяет повысить твёрдость поверхности и глубину упрочнения, но и нивелировать резкий перепад твёрдости между азотированным слоем и основным материалом (рис. 5), что значительно снижает

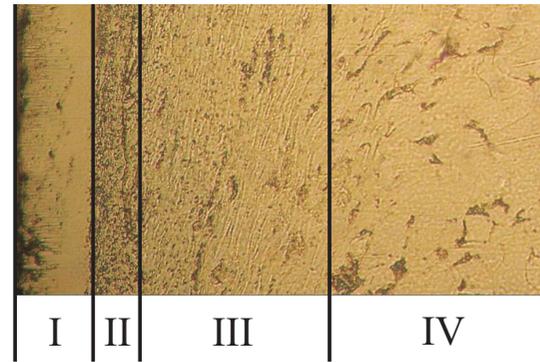


Рис. 4: Фотография среза образца

вероятность растрескивания поверхностного слоя при высоких локальных нагрузках.

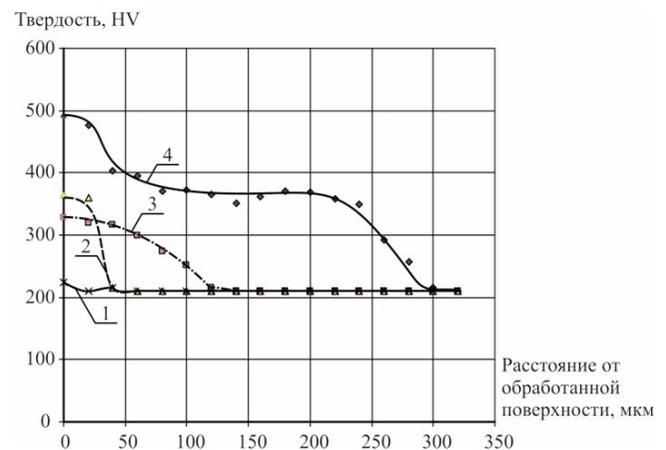


Рис. 5: Профиль микротвёрдости образцов по глубине: 1 — без обработки, 2 — после азотирования, 3 — после ультразвукового ППД, 4 — после азотирования с последующим ультразвуковым ППД

Также для каждой зоны поверхностного слоя методом атомно-силовой микроскопии с помощью микроскопа СММ–2000 получены топографии участков 1x1 мкм (рис. 6).

Топографии поверхностей иллюстрируют снижение субшероховатости от края образца к сердцевине, что является следствием уменьшения силы резания при уменьшении твёрдости участка в процессе пробоподготовки, что коррелирует с результатами, описанными выше.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения экспериментальных исследований разработан комплексный способ упрочняющей обработки, основанный на последовательном применении азотирования и ультразвукового ППД. Предлагаемый метод позволяет добиться значительного повыше-

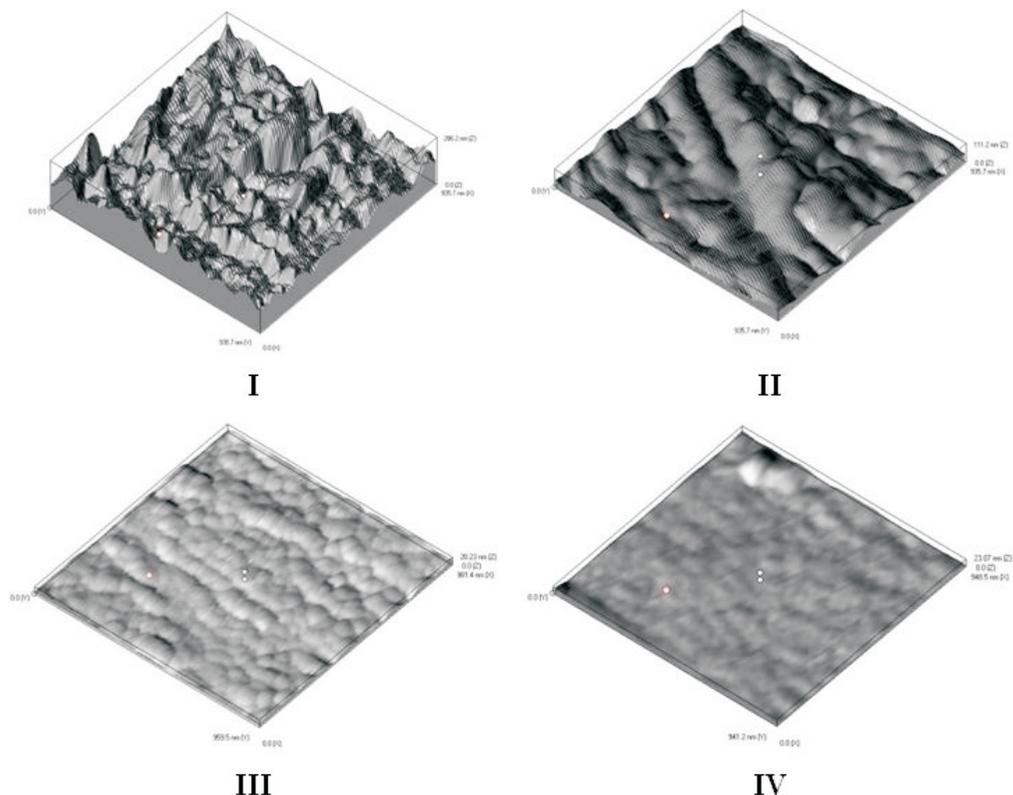


Рис. 6: Топографии поверхностей участков четырёх зон полученного слоя

ния твёрдости поверхностного слоя и глубины упрочнения. При этом структура поверхностного слоя характеризуется четырьмя зонами, на границах которых отсутствуют резкие перепады твёрдости. Таким образом,

применение комплексного метода упрочнения позволяет устранить недостатки азотирования за счёт применения ультразвукового ППД, а также существенно повысить эксплуатационные свойства изделия в целом.

[1] Приходько В. М. Ультразвуковые технологии при производстве, эксплуатации и ремонте автотракторной тех-

ники. (М.: Издательство «Техполиграфцентр», 2003).

## Study of the properties of the surface coating layer is obtained by nitriding with subsequent ultrasonic hardening treatment

I. V. Danilin, S. K. Sundukov<sup>a</sup>, D. S. Fatyukhin

The Moscow state automobile & road technical university

E-mail: <sup>a</sup>sergey-lefmo@yandex.ru

The hardness of steel is one of the most important properties that determine its durability. To increase the hardness of the surface hardening technology used, nitriding and surface plastic deformation, which is based on a fundamentally different processes. The application of the combined method can improve the hardness of the surface layer of the material and increase the depth of hardening. This paper presents the results of studies of the properties of coatings obtained by nitration followed by ultrasonic hardening treatment.

PACS: 62.30.+d

Keywords: hardness, strength, nitriding, sonication.

Received 06.11.2014.

**Сведения об авторах**

1. Данилин Игорь Вячеславович — лаборант кафедры «Технология конструкционных материалов»; тел. 8-499-155-08-68.
2. Сундуков Сергей Константинович — канд. техн. наук, ассистент кафедры «Технология конструкционных материалов»; тел. 8-499-155-08-68, e-mail: sergey-lefmo@yandex.ru.
3. Фатюхин Дмитрий Сергеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология конструкционных материалов»; тел. 8-499-155-08-68, e-mail: mitriy2@yandex.ru.