

УДК 669.056.9:621.923

**А. А. Маликов**, д-р техн. наук, проф., **Е. В. Маркова**, канд. техн. наук, доц.,  
**О. В. Чечуга**, канд. техн. наук, доц.

ФГБОУ ВО Тульский государственный университет, ТулГУ

Тел.: +7 872254648; E-mail: [marta06@yandex.ru](mailto:marta06@yandex.ru)

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МИКРОИНДЕНТИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

*Представлены результаты исследований механических характеристик поверхностных слоев высокопрочных покрытий. Проведен анализ возможности применения метода микроиндентирования для определения таких характеристик как твердость и износостойкость.*

*Ключевые слова:* покрытия, износостойкость, микроиндентирование

**A. A. Malikov, E. V. Markova, O. V. Chechyga**

### THE APPLICATION OF THE METHOD OF MICROINDENTATION TO DETERMINE THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE SURFACE LAYER

*Presents the results of research of mechanical characteristics of surface layers of high-strength coatings. The analysis of the application of the method of microindentation for determining characteristics such as hardness and wear resistance has been studied.*

*Key words:* coating, wear resistance, microindentation

#### Введение

Наличие прочной ковалентной и ионно-ковалентной связи в сверхтвердых материалах и покрытиях определяет высокий уровень их механических свойств, а однотипный, преимущественно хрупкий и квазихрупкий характер разрушения при механическом воздействии, обусловлен малой подвижностью дислокаций и большими энергиями их активации.

Особенностью кинетики распространения трещин в квазихрупких структурах является то, что она реализуется с предельно высокими скоростями. Топография зарождения квазихрупкой трещины по глубине поверхностного слоя в существующих модельных подходах определяется коэффициентом трения.

Для оценки работоспособности поверхностного слоя важно определить его физико-механическое состояние и структуру. Использование этих параметров качества для оптимизирующей классификации технологических методов поверхностной обработки по степени их влияния на износостойкие свойства является перспективным. Геометрические характеристики качества поверхностного слоя оказывают влияние на эксплуатационные параметры покрытий.

Одним из методов поверхностной обработки покрытий является метод алмазного шлифования, преимуществами которого является повышение эксплуатационных свойств обработанных поверхностей, снижение шероховатости поверхности, отсутствие переноса на обрабатываемую поверхность посторонних частиц, возможность обработки тонкостенных деталей и деталей сложной конфигурации т.п.

Для анализа свойств поверхностного слоя различных покрытий после алмазного шлифования был применен метод микроиндентирования, позволивший с одной стороны, определить основные механические характеристики - микротвердость, трещиностойкость, а с другой - дать возможность исследовать влияние обработки на

состояние поверхностного слоя микронных глубин, выпадающих из рассмотрения при изучении с помощью электронной микроскопии и рентгеновской дифракции.

Целью данной работы является адаптация метода микроиндентирования для определения механических характеристик поверхностного слоя – твердости и износостойкости.

### Основное содержание и результаты работы

В качестве материалов для исследования были выбраны 4 типа покрытий: карбонитридное  $Fe_m(N,C)_n$ ; нитридосилицидное  $Si_3N_4$ ; боридное  $Fe_mB_n$  и композит 10Д.

Микроиндентирование проводили на приборе ПМТ-3 по стандартной методике при комнатной температуре. В качестве индентора использовали алмазный наконечник в форме четырехгранной пирамиды с квадратным основанием и углом при вершине  $\alpha = 136^\circ$ . Нагрузка ( $P$ ) на индентор варьировалась в пределах 5–50 г.

Результаты эксперимента показали, что микротвердость исследуемых материалов немонотонно изменяется по глубине поверхностного слоя  $\sim 10$  мкм, причем характер кривых аналогичен для всех материалов (рис.1).

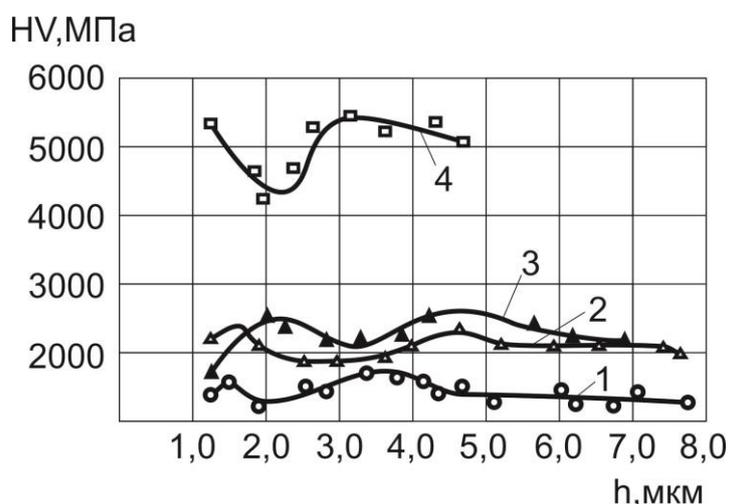


Рисунок 1. Зависимость микротвердости HV от глубины внедрения индикатора в термодиффузионные покрытия: 1) карбонитридное  $Fe_m(N,C)_n$ ; 2) нитридосилицидное  $Si_3N_4$ ; 3) боридное  $Fe_mB_n$ ; 4) композит 10Д

Сложный вид полученной зависимости « $HV-h$ » объясняется параллельным действием целого ряда факторов. Наблюдаемая не монотонность определяется прежде всего структурным состоянием тонких поверхностных слоев образцов, подвергшихся абразивной обработке и возможным существованием в связи с этим градиента механических свойств по глубине, обусловленного как фазовыми и субструктурными изменениями, и так и неоднородностью напряженного состояния.

Тренд кривой  $HV(h)$  определяется особенностями микроразрушения данных высокопрочных материалов, которые заключаются в их повышенной хрупкости в результате отсутствия запаса микропластичности из-за низкой мобильности дислокации. В результате при наложении внешних напряжений, происходит частичная

релаксация внутренних напряжений, созданных в виде микрорастрескивания. При этом качественным показателем склонности к охрупчиванию может служить степень снижения твердости при увеличении нагрузки.

Таблица 1. Значения микромеханических параметров, полученных при микроидентировании высокотвердых покрытий.

Вид материала покрытия	Микротвердость HV, ГПа	Трещиностойкость $K_C$ , МПа*м <sup>1/2</sup>	Индекс хрупкости $HV/K_C * 10^3$ м <sup>1/2</sup>
карбонитридное $Fe_m(N,C)_n$	18,5	5,5	10,2
нитросилицидное - $Si_3N_4$	20,4	4,2	4,7
боридное $Fe_mB_n$	21,8	4,1	5,4
Композит 10Д	27,9	3,2	8,3

Стойкость хрупкого материала против абразивного износа согласно теории Эванса определяется не только твердостью. Она зависит от обрабатываемости  $Q$ , обратно пропорциональной произведению  $K_C^{\frac{5}{4}} \cdot HV^{1/2}$ . Проверка данного соотношения показала соответствие экспериментально полученных величин – обрабатываемости  $Q$  и  $K_C^{\frac{5}{4}} \cdot HV^{1/2}$  (рис.2), что свидетельствует о возможности использования данного произведения для оценки обрабатываемости исследуемого круга материалов.

Полученные результаты позволяют говорить об одинаковом механизме разрушения данных материалов, а также о необходимости учета обоих параметров - и микротвердости, и трещиностойкости для характеристики интенсивности износа.

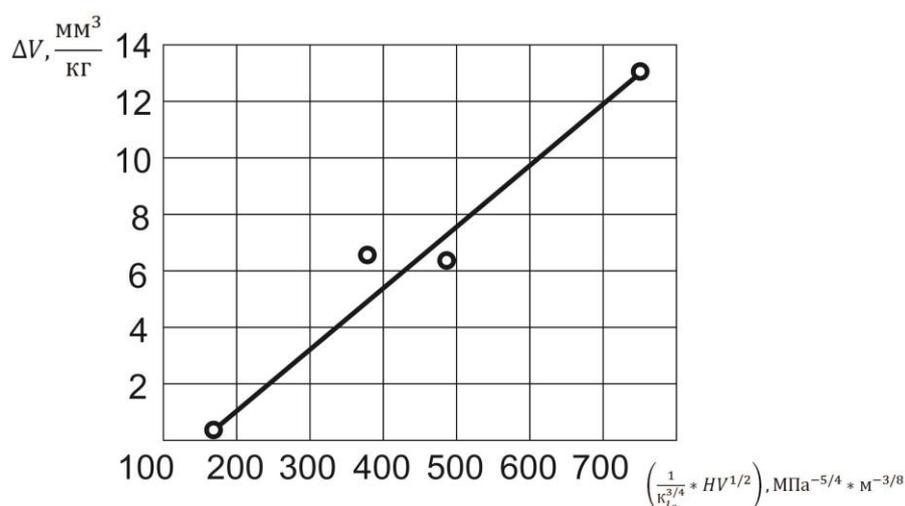


Рисунок 2. Зависимость интенсивности объемного износа  $\Delta V$  от микромеханических параметров карбонитридного слоя никотрированной стали 30ХН2МФА

Вместе с характеристикой трещиностойкости исследовали параметры, количественно характеризующие сопротивление хрупкому разрушению: критерий инициирования трещин, определяющий начальные условия для трещинообразования, равный отношению нагрузки к длине трещины, а также индекс хрупкости  $HV/K_c$ . Был введен также параметр  $h_{тр}$  – глубина зоны интенсивного трещинообразования, характеризующая глубину поверхностного слоя с повышенной хрупкостью, численно равная глубине, на которой более 50% отпечатков имели микротрещины.

Было получено, что высокоэнергетический процесс алмазного шлифования вызывает нестабильность структуры и физико-механических свойств поверхностного слоя.

Диапазон структурных изменений, изученных с помощью комплекса методов, достаточно широк, и роль их неоднозначна. При этом особый интерес представляет анализ зависимости данных процессов от режимов обработки с целью возможного управления ими.

Исследования параметров алмазной обработки на структуру материала проводили в большом интервале режимов шлифования с последовательным, а также параллельным изменением одной или нескольких характеристик. К таким характеристикам отнесли скорость круга  $U$ , поперечную подачу  $S_{поп}$ , продольную подачу  $S_{пр}$ , зернистость алмазных кругов  $Z$ , силу тока в цепи управления  $J$  при шлифовании кругами на металлической связке с одновременным электрохимическим управлением режущим рельефом. Результаты показали существование в ряде случаев зависимости интенсивности структурных и физических процессов, оцениваемой с помощью определенных количественных и качественных критериев, от режимов обработки (табл. 2).

Как видно из табл. 2, обработка пластины в режиме 1 не вызывает существенных изменений фазового состава поверхностного слоя. В образцах, обработанных на более жестких режимах 2, наблюдали содержания прочных фаз.

Таблица 2. Влияние режимов абразивной алмазной обработки на параметры структуры поверхностного слоя никотрированной стали 30ХН2МФА.

Режимы алмазного шлифования	Уширение рентгеновской линии $\beta_{200}$ , Мрад.	Глубина зоны интенсивного трещинообразования $h_{тр}$ , мкм.
Исходное состояние	6,3	5,0
Режим 1: $U=15\text{м/с}$ ; $S_{поп}=0,005$ мм/ход. $S_{пр}=1$ м/мин.	5,9	4,5
Режим 2: $U=30\text{м/с}$ ; $S_{поп}=0,01\text{мм/ход}$ . $S_{пр}=2$ м/мин	4,0	3,6

### Заключение

В результате исследований получено, что шлифование предопределяет нестабильность субструктурных характеристик, (интенсивность линии  $\beta_{200}$  уменьшается) и, особенно, на более жестком режиме динамического воздействия абразивного зерна. Влияние режимов обработки сказывается также на микромеханических характеристиках, приводя к увеличению глубины зоны интенсивного трещинообразования в покрытии при одновременном изменении ряда параметров алмазного шлифования

В ходе проведения исследований получено, что метод микроиндентирования, позволяет как определить основные механические характеристики - микротвердость, трещиностойкость, так и анализировать влияние обработки на состояние поверхностного слоя микронных глубин, которые выпадают из рассмотрения при изучении с помощью электронной микроскопии и рентгеновской дифракции.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Власов, В. М. Работоспособность высокопрочных термодиффузионных покрытий в узлах трения машин / В. М. Власов, Л. М. Нечаев – Тула: Приокс. книжн. изд-во, 1994. – 237 с.

2. Нечаев, Л. М. Повышение антифрикционных свойств конструкционных сталей путем применения низкотемпературной химико-термической обработки / Л. М. Нечаев, Н. Б. Фомичева, Г. В. Сержантова, И. Ю. Канунникова / Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр.; под ред. В. В. Измайлова – Тверь: ТГТУ, 2014.– С. 107-112.

3. Солдатенков, И. А. Расчет трения индентора с фрактальной шероховатостью о вязкоупругое основание: уточненная модель / И. А. Солдатенков // Трение и износ. – 2016.– Т. 37. – № 6. – С. 670 - 672.

4. Герасимов, А. Б., О распределении величины микротвердости по глубине образца. / А. Б. Герасимов [и др.] // Физика твердого тела, 1999.– Т. 41. – № 7. – 1225 с.

5. Нечаев, Л. М. Распределение внутренних напряжений по глубине поверхностного слоя стали 65С2ВА / Л. М. Нечаев, Н. Б. Фомичева, Е. В. Маркова. // Материалы V Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов», 26-29 ноября 2013г. Москва, ИМЕТ РАН: сборник науч.тр., 2013.– Москва – С. 339-340.

Поступила в редколлегию 13.03.2017 г.