

В. И. Бутенко, д-р техн. наук, проф., **А. Д. Кулинский**, канд. техн. наук, доц.
Донской государственный технический университет
ОАО «Ейский станкостроительный завод», Россия
E-mail: *tm_tfdgtu@mail.com*

МОДИФИЦИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИ НАНОСТРУКТУРИРУЮЩЕЙ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКЕ

Рассмотрены вопросы наноструктурирующей отделочно-упрочняющей обработки с модифицированием материала поверхностного слоя с точки зрения открытой термодинамической системы. Приведены результаты исследования модифицирования слоя на наноуровнях и сформулированы практические рекомендации по составлению технологии отделочно-упрочняющей обработки с одновременным модифицированием материала поверхностного слоя детали.

Ключевые слова: деталь, слой, модифицирование, система, потенциал, зерно, температура, наноструктурирование

V. I. Butenko, A. D. Kulinskij

MODIFICATION OF MATERIAL SURFACE LAYERS OF DETAILS DURING NANOSTRUCTURED FINISHING AND STRENGTHENING PROCESSING

Are considered the questions nanostructured finishing and strengthening processing with modification of material surface layer □ point of view open thermodynamic system. Are produced results of research modified layer at the nanolavels and are formulated practical recommendations for making technology finishing and strengthening processing at the same time with modified material surface layer □ of detail.

Key words: detail, layer, modification, system, potential, grain, temperature, nanostructuring.

1. Введение

Проблема повышения работоспособности деталей машин является наиболее актуальной в современном машиностроительном производстве. Разработаны различные технологические, конструкторские, металловедческие и эксплуатационные пути решения этой проблемы, среди которых перспективным направлением повышения работоспособности деталей трибосистем является формирование на их поверхностях многокомпонентного функционального слоя (МФС), например, за счёт создания модифицированного слоя (МС). Для создания МС на поверхностях деталей может быть использована различная технология, в том числе наноструктурирующая отделочно-упрочняющая обработка (ОУО) [1, 2]. При этом в качестве компонентов, вводимых в материал поверхностного слоя, могут быть использованы полимеры [2, 3], чистые металлы и неметаллы, их химические соединения [4]. Однако отсутствие достаточно полных исследований процессов формирования МС на поверхностях деталей машин при ОУО существенно сдерживает развитие и внедрение в машиностроительное производство технологий их создания.

2. Основное содержание и результаты работы

Анализ результатов выполненных исследований [1 – 4] позволяет сделать вывод о том, что основными условиями формирования МС на поверхности детали при ОУО являются:

1. Протекание процессов поверхностной пластической деформации при ОУО, в ходе которой имеет место энерго-массообмен между частицами, участвующими в формировании модифицированного поверхностного слоя детали.

2. Согласованность скорости перемещения упрочняющего инструмента с процессами энерго-массопереноса в зоне обработки.

3. Выполнение правила Гиббса и критерия Линдемана для формирующегося МС.

4. Обеспечение динамической устойчивости процесса наноструктурирующей ОУО деталей с модифицированием материала поверхностного слоя.

Выполнение этих условий при создании МС в процессе наноструктурирующей ОУО детали предопределяет ряд явлений, происходящих в зоне контакта индентора упрочняющего инструмента с обрабатываемым материалом. Так, при ОУО поверхностей деталей вследствие высоких давлений наблюдаются фазовые перестройки в обрабатываемом материале, приводящие к возможной его аморфизации из-за динамической неустойчивости процесса наноструктурирующей ОУО [4]. При этом в материале поверхностного слоя детали возможно появление новых фаз в виде кластеров, химический состав и структура которых существенно отличаться от основного материала поверхностного слоя.

С термодинамической точки зрения все элементарные акты механохимического процесса возникновения кластеров можно разделить на две характерные группы, отличающиеся кинетическими закономерностями. Первая группа элементарных актов атомно-молекулярных перегруппировок связаны с установлением новых связей и образованием центров кластеров, обуславливая накопление в локальном объеме поверхности скрытой энергии. Элементарные акты второй группы связаны с трансформацией необратимой механохимической энергии в тепловую, что проявляется в виде теплового эффекта. Таким образом, в соответствии с основным законом термодинамики – законом сохранения энергии – уравнение энергетического баланса механохимического процесса создания МС при наноструктурирующей ОУО на уровне локального микрообъема поверхностного слоя можно записать в следующем виде:

$$\Delta MX = \Delta \mathcal{E} + \Delta Q, \quad (1)$$

Где: ΔMX – изменение механохимической и химической потенциальной составляющей внутренней энергии локального объема; $\Delta \mathcal{E}$ – часть тепловой механической и химической энергии, затрачиваемой на образование центра кластера; ΔQ – часть тепловой энергии, рассеивающейся в тело детали и окружающую среду.

Рассматривая сформировавшийся в процессе наноструктурирующей ОУО с модификацией материала поверхностного слоя образовавшийся центр кластера как открытую термодинамическую систему, находящуюся при установившихся механохимических условиях, основным условием его образования можно считать $\Delta \mathcal{E} = \Delta \mathcal{E}_o$, где $\Delta \mathcal{E}_o$ – изменение мольной внутренней энергии системы, определяющее образование центра кластера. Тогда с учетом уравнения Гиббса для оценки изменения внутренней энергии материала, больцмановской интерпретации энтропии, известных из теории сопротивления материалов выражений для оценки энергий упругих и пластических деформаций, выражения Льюиса для оценки химического потенциала модифицирующего компонента энергетическое условие образования кластеров в МС при наноструктурирующей ОУО примет вид [5]:

$$G_T = \sum n_i \mu_i + \gamma_{23} S_{23} + \gamma_{\sigma-m} S_{\sigma-m}, \quad (2)$$

где G_T – термодинамический потенциал системы; n_i – число атомов i -го модифицирующего компонента; μ_i – химический потенциал i -го компонента системы; γ_{z3} – поверхностное натяжение границ зёрен основного материала детали; S_{z3} – площадь поверхности границ зёрен; $\gamma_{в-м}$ – поверхностное натяжение границ «включение – материал поверхностного слоя»; $S_{в-м}$ – площадь поверхности границ «включение – материал поверхностного слоя».

Условие (2) представляет обобщённую кинетическую модель формирования МС на поверхности обрабатываемой детали, учитывающую вклад в этот процесс тепловых, механических, химических и диффузионных сил. Тогда работа A , которая необходима для перевода системы из метастабильного состояния в стабильное для образования кластера в МС, может быть определена из выражения [4]:

$$A = \Delta \mathcal{E} = K_{II} \Delta M X = \frac{1}{3} \pi d^2 \gamma, \quad (3)$$

где $K_{II} = 0,3$ – коэффициент определяющий долю общей работы внешних сил, затрачиваемой на образование кластера [4]; d – диаметр равновесного кластера новой фазы; γ – общее поверхностное натяжение на границе фаз.

Исходя из выражения (3), технологическое условие, обеспечивающее получение МС в процессе наноструктурирующей ОУО на поверхности материала детали, можно записать в следующем виде:

$$TR \ln \left(\frac{t}{t_0} \right) + v_m 10^{-6} \left(\frac{\sigma^2}{2E} + K_\alpha \sigma \frac{d}{D} \right) - \Delta \mathcal{E}^0 = \frac{1}{3} \pi \Delta h^2 \gamma, \quad (4)$$

где T – абсолютная температура материала поверхностного слоя при наноструктурирующей ОУО деталей; R – универсальная газовая постоянная; t – текущая длительность процесса наноструктурирующей ОУО деталей; t_0 – постоянная времени, равная периоду колебаний атомов; v_m – мольный объём; σ – эквивалентное напряжение в материале поверхностного слоя детали; K_α – коэффициент, определяющий относительную активность модифицирующего материала [3]; D – средний размер зёрен материала поверхностного слоя до наноструктурирующей ОУО деталей; $\Delta \mathcal{E}^0$ – изменение уровня энергетического состояния центра кластера, соответствующее работе внешних сил на его образование; Δh – толщина МС поверхности детали.

Левая часть условия (4) является кинетическим уравнением наноструктурирующей ОУО деталей, которое при $t \ll t_n$ (здесь t_n – продолжительность наноструктурирующей ОУО) описывает процесс роста внутренней энергии формируемого МС. В момент времени t_n , когда пластическая деформация при ОУО становится предельной для данного материала, а активность модифицирующих компонентов системы a_i достигает термодинамической константы равновесия $K_T = \prod_{i=1}^n (a_i)^{b_i}$, процесс образования МС

завершается (здесь n – количество модифицирующих компонентов; b_i – процентное или весовое содержание этих компонентов в МС). Тогда обобщённая формула для оценки продолжительности процесса наноструктурирующей ОУО t_n , совмещённой с созданием МС на поверхности обрабатываемой детали будет иметь следующий вид:

$$t_n = \left(\frac{K_T^2 \Delta h}{4D} \right)^{1/3} V_T^{1/2}, \quad \text{с}, \quad (5)$$

где V_T – скорость нагрева материала поверхностного слоя при наноструктурирующей ОУО с его модифицированием.

Полученная зависимость (5) имеет большое практическое значение, так как позволяет минимизировать традиционные в этом случае микроскопические и микро-электромеханические исследования и обеспечить создание нанопрофиля поверхности детали путём исследования образовавшегося МС. Для контроля параметров процесса наноструктурирующего ОУО с модифицированием материала поверхностного слоя и определения качества получаемой поверхности на микро- и нано уровнях могут быть использованы такие приборы, как аналитический автоэмиссионный электронный микроскоп мод. Zeiss SUPRA 25, установка Nanotest 600 platform для измерения микротвёрдости МС, сканирующий зондовый микроскоп Nanoeducator (NT-MDT) и туннельный микроскоп РНУВЕ для изучения профилей поверхности детали.

На профилометре-профилографе мод. 251, подключённом к персональному компьютеру, были получены профилограммы поверхностей деталей из стали 45, прошедших наноструктурирующую ОУО с модифицированием материала поверхностного слоя сплавом Вуда и порошком дисульфида молибдена (рис. 1). Из анализа профилограммы (рис. 1, а) следует, что получаемая в результате обработки шероховатость поверхности имеет сглаженную форму с большими площадками контакта. При этом параметр шероховатости Ra изменяется с 1,2 мкм до 0,7 мкм для закалённой стали и с 1,8 мкм до 1,1 мкм для нормализованной стали.

Установлено, что площадь фактического контакта поверхностей состоит из множества дискретных малых площадок от 0,03 до 3 мкм, расположенных на различных высотах от нулевого уровня. Между площадками касания имеются нанополости, заполненные продуктами изнашивания и химически активными веществами. При этом в зонах касания в зависимости от механических свойств происходит смятие микронеровностей или их внедрение в поверхность более мягкого тела, вследствие чего площадь фактического контакта возрастает при увеличении нагрузки, уменьшении шероховатости поверхности и росте радиуса закругления вершин ее неровностей. С увеличением предела текучести материала и высоты неровностей поверхностей эта площадь уменьшается. Всё это способствует существенному противозносных и противозадирных свойств материала поверхностного слоя детали с различными компонентами МС, исследование которых выполнено на приборе Tribotester T-11 (рис. 2).

Исследования нанопрофиля поверхностного слоя детали после наноструктурирующей ОУО с его модифицированием и 30 мин испытаний в контакте с контртелом из закалённой быстрорежущей стали Р6М5 ($p = 0,5$ МПа, $V_{ск} = 0,3$ м/с, без смазки), проведённые на туннельном микроскопе РНУВЕ (рис. 3), показали, что наблюдается ориентация кристаллитов дисульфида молибдена параллельно плоскости скольжения. При этом важно отметить, что результаты определения коэффициента трения нанострукту-

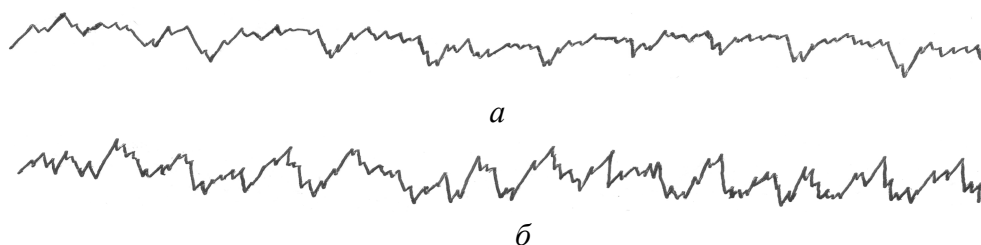


Рис. 1. Профилограммы поверхности детали после ОУО с модифицированием материала (а) и в исходном состоянии (б)

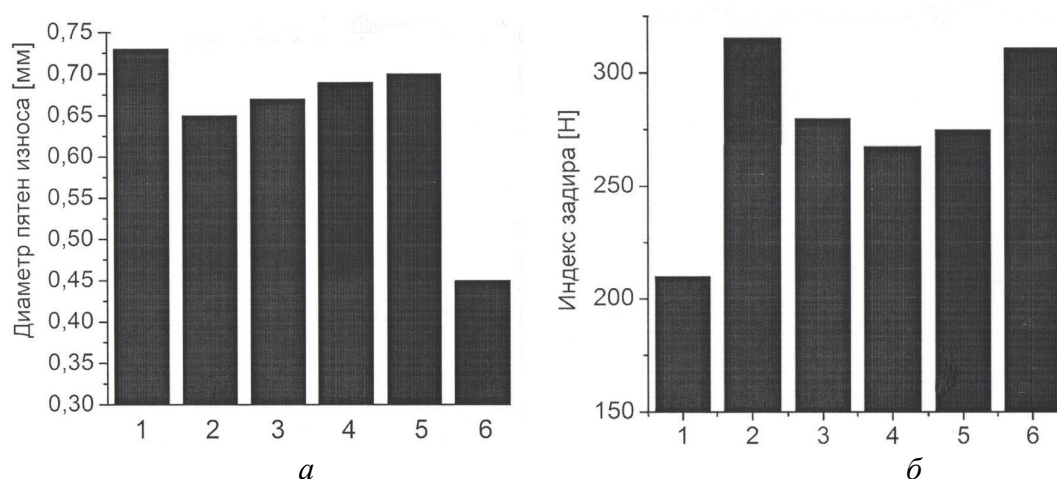


Рис. 2. Противоизносные (а), противозадирные (б) характеристики МФС на полимерной основе: 1 – без МФС; 2 – полиэтилен + сплав Вуда; 3 – полиэтилен + графит; 4 – полистирол + сплав Вуда; 5 – полиэтилен + кристаллический йод; 6 – полиэтилен + графит + кристаллический йод ($P = 196\text{Н}$, $t = 3300\text{ с}$)

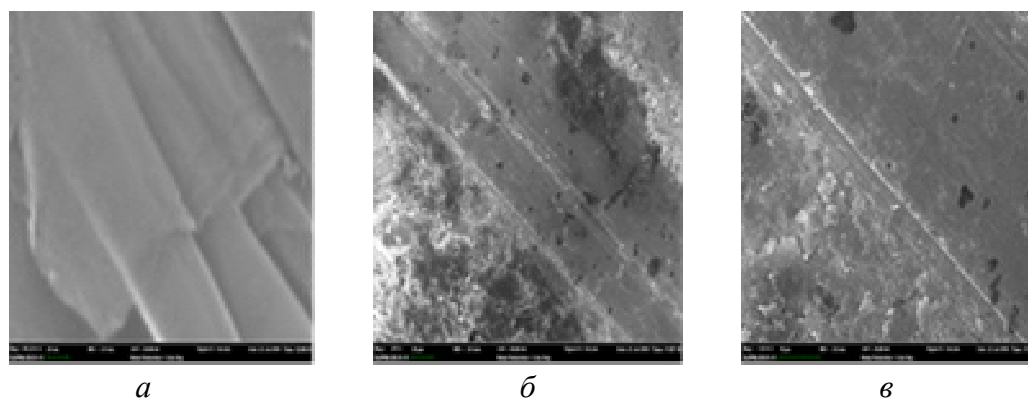


Рис. 3. Поверхностный слой детали после наноструктурирующей ОУО и его модифицирования на микро- и нано уровнях: а – 10 мкм; б – 1 мкм; в – 100 нм;

рированного и модифицированного поверхностного слоя свидетельствуют о его минимизации уже в начальный период работы, т.е. приработка материала поверхностного слоя детали практически отсутствует.

Увеличение внутренней энергии поверхностных слоёв металла в результате пластической деформации приводит к повышению адсорбционной активности металлической поверхности, активности ионов и молекул, увеличению центров зарождения кластеров и, соответственно, формированию поверхностного слоя с управляемыми эксплуатационными показателями. Представленные на рис. 4 изображения состояния МС с последовательным увеличением до 100 нм под углом 30° и результаты исследования образовавшихся в поверхностном слое кластеров с помощью аналитического автоэмиссионного электронного микроскопа Zeiss SUPRA 25 дают основание сделать вывод о том, что между частицами кластера имеет место ионная связь. При этом установлено, что чем больше активных частиц будет в модифицирующих материалах и в поверхностном слое детали, тем выше скорость формирования наноструктурированного и моди-

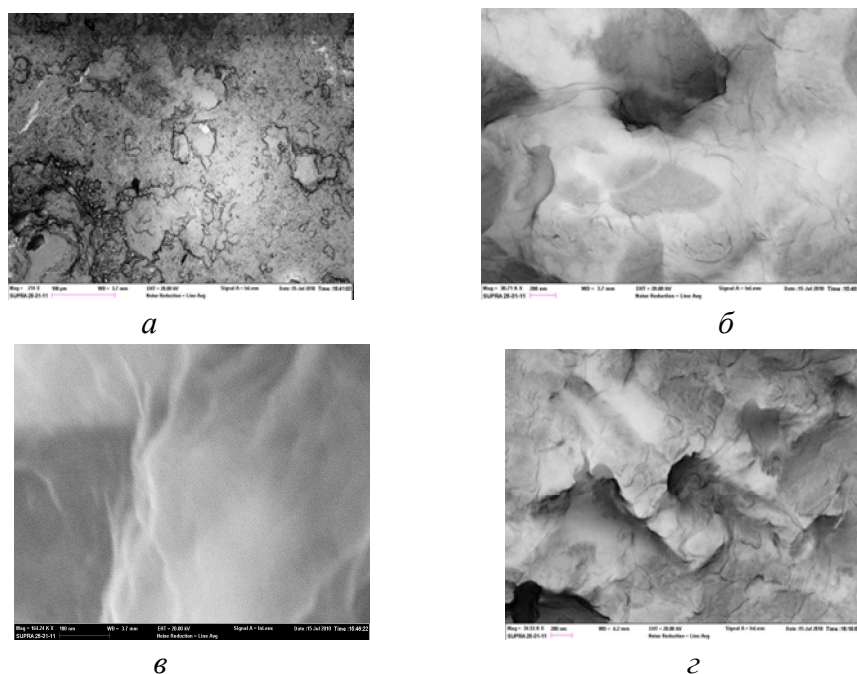


Рис. 4. Изображение состояния модифицированного слоя с последовательным увеличением под углом 30 градусов: *a* – 100 мкм, *б* – 2 мкм; *в* – 200 нм, *г* – 100 нм

фицированного слоя на её поверхности. Число активных молекул можно увеличить, сообщив неактивным молекулам дополнительную энергию, например, путём индукционного нагрева зоны контакта упрочняющего инструмента с обрабатываемой поверхностью детали [1, 2]. При этом необходимую энергию активации W_a можно рассчитать по следующей формуле [4]:

$$W_a = \frac{(lqK_1 - lqK_2)2,3R}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}, \quad \text{или} \quad W_a = \frac{(lqK_1 - lqK_2)2,3 \cdot 10^3}{\frac{1000}{T_2} - \frac{1000}{T_1}}, \quad (6)$$

где K_1, K_2 – некоторые константы, определяющие скорости протекания процессов в модифицируемом материале при наноструктурирующей ОУО деталей; T_1, T_2 – значения абсолютных температур, при которых происходит модифицирование материала, К.

Из формулы (6) следует, что, варьируя режимами наноструктурирующей ОУО, можно получать МС не только разной толщины, но и разного состава как по глубине, так и вдоль поверхности при одних и тех же исходных модифицирующих материалах.

3. Общий алгоритм и рекомендации

Комплекс выполненных в настоящей работе исследований позволил разработать общий алгоритм процесса модифицирования материала поверхностного слоя деталей при наноструктурирующей ОУО, включающий:

1. Выбор модифицирующего материала в зависимости от условий эксплуатации детали.
2. Назначение требуемой толщины МС Δh в соответствии с эффектом «нанотрибологической ямы» [2].

3. Установление начальной шероховатости поверхностного слоя детали по параметру Ra .

4. Назначение режимов наноструктурирующей ОУО, обеспечивающих возможность модифицирования материала поверхностного слоя детали.

5. Определение времени проведения наноструктурирующей ОУО с модифицированием материала поверхностного слоя детали t_n по формуле (5).

6. Контроль толщины МС Δh по обработанной поверхности детали с использованием выше рассмотренных приборов.

Эффективность наноструктурирования и модифицирования материала поверхностного слоя деталей при ОУО существенно повышается за счёт сочетания или объединения различных схем упрочнения (алмазного выглаживания, вибронакатывания, вибровыглаживания) с другими технологическими процессами.

4. Цифровые модели

Используя формулы (1) – (6), разработана комплексная структурно-логическая цифровая модель определения Δh для создания на поверхностях деталей трибосистем МС требуемой толщины и структуры в процессе наноструктурирующей ОУО и в соответствии с концепцией функционального единства операций финишной обработки деталей. Модель реализована в программном пакете MATLAB с использованием пакета программ NuMECA и прошла апробацию на ряде машиностроительных предприятий России.

5. Заключение

Таким образом, выполненные исследования и их обсуждение на основе современных термомеханических представлений о формировании МС при наноструктурирующей ОУО поверхностей деталей позволили реализовать следующее:

1. Описать физические явления, происходящие в материале поверхностного слоя детали при наноструктурирующей ОУО с модифицированием.

2. Установить закономерности возникновения в МС центров кластеров и их поведения.

3. Разработать рекомендации по повышению износостойкости поверхностей деталей трибосистем путём создания МС при их наноструктурирующей ОУО.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бутенко В. И. Отделочно-упрочняющая обработка деталей с модифицированием материала поверхностного слоя // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. – №6. – С. 41 – 45.

2. Бутенко В. И., Дуров Д. С., Шаповалов Р. Г. Научно-технические технологии создания высокоресурсных деталей машин. // Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2014. – 404 с.

3. Бутенко В. И. Технология создания металлополимерных слоёв на контактных поверхностях деталей трибосистем // Научно-технические технологии в машиностроении. 2011. – №12. – С. 38 – 45.

4. Бабичев А. П., Иванов В. В., Мотренко П. Д., Худалей С. Н. Вибрационная механохимия в процессах отделочно-упрочняющей обработки и покрытий деталей машин. – Ростов-на-Дону: Издат. центр ДГТУ, 2012. – 204 с.

5. Бутенко В. И. Физико-технологические основы формирования управляемых структур сталей и сплавов. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 264 с.

Поступила в редколлегию 16.12.2015 г.