

МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СЛОИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Бутенко В.И., Дуров Д.С., Шаповалов Р.Г. (ИПТСиУ ЮФУ,
г. Таганрог, Россия)

Тел. +7 (8634) 371-622; E-mail: mkk@egf.tsure.ru

Abstract: Are developed innovative technologies used for creation of multicomponent functional layers on surfaces of details of tribosystems the most effective areas of their use and are determined. The features of operation of details of machines with multicomponent functional layers are revealed and their structures determined optimal. The role of iodine in the modified ambassador of finishing-hardening processing a superficial layer of details is shown and the description of creation of such layers is given. The results of test on durability of details of machines with various multicomponent functional layers are given.

Key words: a detail, surface, layer, components, easily fusible alloy, graphite, iodine, system, processing, durability.

В современном машиностроении актуальным является проблема обеспечения высокой надёжности деталей, эксплуатируемых в экстремальных условиях. Одним из направлений решения этой проблемы является создание на поверхностях деталей структур, которые обладали бы свойствами саморегулирования и самоуправления. Создать такие структуры можно комбинированной обработкой деталей с использованием высококонцентрированных потоков энергии, модифицированием материала поверхностного слоя, применением наноструктурирующей отделочно-упрочняющей обработки (ОУО) [1, 2]. Однако наиболее эффективным путём создания саморегулирующихся и самоуправляемых структур на рабочих поверхностях деталей, является формирование на них многокомпонентных функциональных слоёв (МФС) [3, 4], которые могут быть классифицированы по следующим основным признакам: функциональному назначению, способу формирования (или технологии получения), количеству компонентов, свойствам используемых компонентов. При этом МФС могут быть получены на полимерной основе (полиэтилен, полистирол, капрон), на основе легкоплавких сплавов (сплавы Вуда и Розе), а также на смешанной основе с использованием компонентов с функционально заданными свойствами.

Металлополимерные слои могут быть созданы на рабочих поверхностях деталей либо на модернизированной установке для нанесения на поверхность слоёв, смонтированной на базе токарно-револьверного станка [3], либо на специально разработанном станке для нанесения металлополимерных слоёв на детали [1]. Такие слои рекомендуется создавать на поверхностях деталей, работающих в агрессивных средах с высокой запылённостью при температурах не выше 80 – 100°С. Исследования показали, что создание на рабочих поверхностях деталей трибосистем металлополимерного наноструктурного слоя приводит не только к снижению в 2,5 – 3,0 раза силы трения в зоне контакта, но и обеспечивает более стабильный характер процесса контактирования материалов, что способствует повышению точности перемещения (позиционирования) сопряжённых деталей [3].

Экспериментальные исследования показали [1, 2, 4, 5], что технологии создания МФС на основе легкоплавких сплавов рекомендуется применять в тех случаях, когда эффект достигается за счёт:

- нивелирования шероховатости контактных поверхностей деталей и, как следствие, уменьшения времени их приработки;

- создания между контактирующими поверхностями деталей разделительного смазочного слоя, работающего только при заданных условиях эксплуатации (в первую очередь, температуры);

- выхода на условия, обеспечивающие проявление эффекта «нанотрибологической ямы» при существенном снижении коэффициента трения в контактной зоне [2].

Технология создания МФС на основе легкоплавких сплавов предусматривает совмещение ОУО деталей с подачей в зону контакта упрочняющего инструмента с обрабатываемой поверхностью предварительно прокатанной фольги из легкоплавкого сплава толщиной не более 0,05 мм. Рекомендуется назначать «мягкие» режимы ОУО: $P = 200 - 300$ Н, $S_{np} = 0,1 - 0,2$ мм/об, $m = 2 - 3$. Особое внимание должно быть уделено состоянию поверхности детали, на которую наносится МФС. Она должна быть химически чистой и иметь шероховатость в пределах $Ra = 0,32 - 1,25$ мкм в зависимости от заданных условий эксплуатации.

Определённый интерес представляет разработка единой технологической операции, совмещающей ОУО поверхностей деталей с модифицированием материала поверхностного слоя и обеспечивающей снижение интенсивности изнашивания деталей, эксплуатируемых в экстремальных условиях при высоких температурах. Разработан и исследован способ ОУО рабочих поверхностей деталей на модернизированной установке [3] с созданием в нём МФС. Для этого на поверхность детали в зону контакта упрочняющего ролика с обрабатываемой поверхностью детали подавалась алюминиевая фольга толщиной не более 0,05 мм с нанесёнными и закреплёнными на ней графитовым порошком и кристаллическим йодом. С целью выявления эффективности разработанной технологии создания МФС и исследования особенностей поведения йода в контактной зоне сопряжённых поверхностей деталей ОУО подвергались бесступенчатые валики из стали 12Х3Н диаметром 40 мм и длиной 320 мм, прошедшие предварительное шлифование и имеющие начальную шероховатость поверхности $Ra = 0,80 - 1,20$ мкм. Упрочняющие ролики изготавливались из быстрорежущей стали Р6М5 и после закалки имели твёрдость HRC 62...65. Были приняты следующие режимы обкатки: усилие прижима ролика к обрабатываемой поверхности детали $P = 1000$ Н, частота вращения детали $n_d = 80$ об/мин; продольная подача $S_{np} = 0,1$ мм/об; количество проходов $m = 3$; величина импульсного тока составляла $I = 2,5$ КА, что позволяло создавать в зоне контакта роликов и обрабатываемой поверхности температуру нагрева в диапазоне 250 – 300°C. Такие режимы обработки способствовали созданию на поверхности детали достаточно плотного модифицированного слоя, толщиной 0,3 – 0,5 мм, имеющего твёрдость, равную 80-90% твёрдости основного материала детали и хорошую сцепляемость с ним ($\tau_{сц} = 150 - 180$ МПа).

Работоспособность деталей после ОУО с модифицированием материала поверхностного слоя оценивалась по интенсивности изнашивания поверхностного слоя. Исследования проводились на установках и машинах трения, позволяющих создавать в зоне контакта деталей давления $p = 0,1 - 4,0$ МПа, скорости скольжения $V_{ск} = 0,05 - 1,5$ м/с, температуру $\theta = 20 - 400$ °С как в обычных, так и агрессивных средах [2, 7]. Было установлено, что создание на поверхностях деталей трибосистем модифицированного слоя путём ОУО с применением алюминиевой фольги, графита и кристаллического йода позволяет существенно снизить коэффициент трения при повышенных температурах в зоне контакта взаимодействующих поверхностей.

Используя метод планирования эксперимента типа 2^k , были получены следующие эмпирические зависимости интенсивности изнашивания I для следующих диапазонов изменения давления p , скорости скольжения $V_{ск}$, и температуры в зоне контакта θ :

$$\begin{aligned}
p &= 0,2 - 1,0 \text{ МПа}; V_{ск} = 0,1 - 0,5 \text{ м/с}; \Theta = 50 - 150^\circ \text{ С}; \\
I &= 4,754 p^{0,792} V_{ск}^{0,426} \Theta^{0,275}, \text{ мг/час}; \\
p &= 1,0 - 1,5 \text{ МПа}; V_{ск} = 0,5 - 1,0 \text{ м/с}; \Theta = 150 - 250^\circ \text{ С}; \\
I &= 5,947 p^{0,704} V_{ск}^{0,434} \Theta^{0,361}, \text{ мг/час}; \\
p &= 1,5 - 2,5 \text{ МПа}; V_{ск} = 1,0 - 2,0 \text{ м/с}; \Theta = 250 - 400^\circ \text{ С}; \\
I &= 6,1284 p^{0,753} V_{ск}^{0,486} \Theta^{0,412}, \text{ мг/час}.
\end{aligned}$$

Добавка кристаллического йода в закрепляемый на фольге графитовый порошок способствует не только снижению коэффициента трения в зоне контакта, но и создаёт в процессе трения на сопряжённой поверхности детали плёнку, выполняющую роль твёрдой смазки. Это было подтверждено спектрографическим анализом материала поверхностного слоя деталей контртел из сталей X18H9T и 12X3H, контактируемых с модифицированными поверхностями образцов из стали 45, на сканирующем электронном микроскопе «Quanta – 200». Результаты выполненных исследований подтвердили ранее высказанное предположение о трибоэкракировании поверхностных слоёв сопряжённых деталей [8, 9].

Исследованиями установлено, что оптимальное количество йода в модифицируемом материале поверхностного слоя детали определяется как его состоянием после предварительной обработки по параметрам шероховатости, структуры и величины технологических остаточных напряжений, режимов обкатки, так и условиями эксплуатации. Так, для принятых режимов ОУО, начальной шероховатости поверхности после шлифования и условий эксплуатации до температуры до $\Theta = 250^\circ\text{С}$ рекомендуется добавлять в наносимый на алюминиевую фольгу графит 5 – 8% (по объёму) кристаллического йода. Если температура эксплуатации детали с модифицированным слоем превышает 250°С , то вместо кристаллического йода, рекомендуется на фольге закреплять в количестве 15 – 20% (по объёму от графита) размельчённый диодид хрома [5].

Другой перспективной технологией создания МФС с направленной модификацией материала поверхностного слоя деталей может стать способ обработки цилиндрических деталей [5], включающий поверхностное пластическое деформирование детали роликом с постоянным усилием и с непрерывной подачей в зону поверхностного пластического деформирования смазочно-плакировочной жидкостной композиции, содержащей компоненты в следующих соотношениях (масс. %): измельчённый графит – 2,5 – 3,0; кристаллический йод – 0,05 – 0,08; минеральное масло – остальное. В качестве измельчённого графита рекомендуется использовать твёрдую графитовую смазку с размерами основной фракции не более 3 мкм. Добавление в смазочно-плакировочную жидкостную композицию кристаллического йода не только способствует созданию на сопряжённой поверхности детали йодистых соединений с низкими коэффициентами трения [4 – 6], но и повышает температурную устойчивость графита. Толщина образующегося наноструктурного железоуглеродойодистого слоя составляет 60-80 нм. Созданный на поверхности детали регулярный микрорельеф в процессе эксплуатации выполняет функцию «масляных карманов» для образовавшихся кластерных наноструктур, увеличивая стойкость детали к поверхностному истиранию.

Оценка эффективности смазочно-плакировочной жидкостной композиции и созданного с её помощью железоуглеродойодистого нанослоя осуществлялась по величине интенсивности изнашивания поверхностного слоя образцов из разных конструкционных материалов и при различных условиях эксплуатации. Предварительно исследуемые образцы подвергались шлифованию и имели шероховатость $Ra = 0,80 - 1,25$ мкм. В качестве контртела использовались бруски из быстрорежущей стали P6M5, закалённые до твёрдости HRC 62...65 и шероховатостью поверхности не выше $Ra = 0,80$ мкм. Результаты выполненных исследований приведены в таблице, из анализа которой сле-

дует, что создание на поверхностях деталей железоуглеродистой нанослой позволяет в 2 – 4 раза повысить износостойкость их рабочих поверхностей. При этом в зону контакта трущихся поверхностей деталей при их эксплуатации не надо дополнительно подавать смазку, а выбор того или иного МФС на поверхностях деталей обусловлен конкретными условиями эксплуатации.

Таблица 1 - Средняя интенсивность изнашивания образцов I из разных материалов в зависимости от состояния их поверхностей

Обрабатываемый материал	Условия эксплуатации			Интенсивность изнашивания, $I \times 10^{-4}$, г/ч	
	p , МПа	$V_{ск}$, м/с	θ , °С	без железоуглеродистой нанослой	с железоуглеродистым нанослоем
12Х2Н4А	0,5	0,2	100	20,6	9,8
20ХН2МА	0,5	0,2	100	19,5	9,3
20ХН2МА	0,5	0,5	200	28,1	13,2
30ХГСА	1,0	0,5	200	32,6	14,5
30ХГСА	1,5	1,0	200	44,8	17,4
45Х25Н20С2	1,0	1,0	300	36,5	14,8
45Х25Н20С2	1,5	1,0	300	39,2	15,3
ХН70ВМТЮ	1,5	1,0	500	48,4	13,7
ХН70ВМТЮ	1,5	1,0	800	72,9	17,6
ХН77ТЮР-ВД	1,5	1,0	800	65,3	14,9

Список литературы: 1. Бутенко В.И. Управление нанотрибологическими характеристиками поверхностей тяжело нагруженных опор и подшипников скольжения. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – 385 с. 2. Бутенко В.И. Структура и свойства поверхностного слоя деталей трибосистем. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – 367 с. 3. Бутенко В.И. Технология создания металлополимерных слоёв на контактных поверхностях деталей трибосистем // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2011, № 6. – С. 42 – 48. 4. Бутенко В.И. Научноёмкие технологии в процессах создания многокомпонентных функциональных слоёв на рабочих поверхностях деталей // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2013, № 9. – С. 35 – 39. 5. Способ обработки цилиндрических деталей. Патент РФ №2412042, МПК В24В 39/04, С10М 141/00. / Бутенко В.И. Заявл. 11.08. 2009. Опубл. 20.02.2011. Бюл. №5. 6. Бутенко В.И., Гусакова Л.В. Повышение эффективности шлифования поверхностей деталей машин. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2012. – 176 с. 7. Бутенко В.И. Научные основы нанотрибологии. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – 275 с. 8. Шульга Г.И., Бутенко В.И., Гусакова Л.В. Технологическое трибоэкранирование поверхностей деталей трибосистем / В кн.: Практика и перспективы развития партнёрства в сфере высшей школы. Материалы 13-го междунар. научно-практич. семинара. Кн. 3. – Таганрог-Донецк: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – С. 278 – 286. 9. Бутенко В.И., Дуров Д.С., Шаповалов Р.Г. Научноёмкие технологии создания высокоресурсных деталей машин. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2014. – 404 с.