

Линьков Дмитрий Александрович

студент

Бутенко Виктор Иванович

д-р техн. наук, профессор

Таганрогский политехнический
институт (филиал)

ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет»

г. Таганрог, Ростовская область

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

***Аннотация:** с целью повышения работоспособности деталей машин разработаны способы отделочно-упрочняющей обработки деталей машин, позволяющие получать поверхности с управляемым регулярным микрорельефом и заданными физико-механическими свойствами. Исследованы способы отделочно-упрочняющей обработки деталей с одновременным модифицированием материала поверхностного слоя. Авторами установлено, что подаваемый в зону обработки йод способствует созданию на сопряжённых поверхностях деталей йодной смазочной плёнки, существенно снижающей коэффициент трения.*

***Ключевые слова:** деталь, упрочняющий ролик, амплитуда, частота колебаний, микрорельеф, усталостная прочность, износостойкость.*

В работах [1–3] показано, что одним из перспективных направлений по совершенствованию существующих и разработке новых технологических методов отделочной обработки деталей машин является концепция, основанная на рассмотрении единства процессов обработки и эксплуатации детали [4]. В этом направлении разработаны и успешно используются в металлообработке различные способы отделочно-упрочняющей обработки (ОУО) и инструменты для их осуществления [1; 3]. Так, например, с целью обеспечения возможности форми-

ровать на поверхности детали регулярный микрорельеф в зависимости от твёрдости обрабатываемого материала и деформирующего ролика разработан способ ОУО цилиндрических деталей, сущность которого состоит в следующем [5]. Поверхностное пластическое деформирование (ППД) обрабатываемой детали осуществляется роликом, установленным на суппорте токарного станка, с постоянным радиальным усилием при сообщении ему дополнительных движений. Для этого деформирующий ролик кинематически связан с шаговым приводом линейного перемещения, от которого он получает колебательные движения относительно плоскости, перпендикулярной оси детали, амплитуда A и частота f которых предварительно определяются по формулам:

$$A = 10^{-3} S_m (1 - K_{HV}), \text{ мм}; \quad f = \frac{n_d}{60} K_{HV}, \text{ Гц}, \quad (1)$$

где S_m – шаг регулярного микрорельефа на обрабатываемой поверхности детали, мм; K_{HV} – коэффициент, определяемый отношением твёрдости обрабатываемого материала детали HV_d к твёрдости материала деформирующего ролика HV_p ; n_d – частота вращения обрабатываемой детали, об/мин.

Одновременно упрочняющий ролик дополнительно имеет возможность совершать возвратно-поступательные перемещения в сторону воздействия шагового линейного привода, т.е. параллельно основному движению. При этом величина дополнительного возвратно-поступательного перемещения ролика принимается равной $L = (1,5 - 2,0) A$. В результате при нанесении на поверхность обрабатываемой детали регулярного микрорельефа учитывается твёрдость материалов детали и деформирующего ролика, а на поверхности образуется регулярный микрорельеф в виде пересекающихся волн переменной плотности по амплитуде и шагу, изменяющихся в диапазоне, зависящем от твёрдости материалов детали и ролика. Это позволяет повысить усталостную прочность и стойкость к поверхностному истиранию обрабатываемой детали как за счёт наносимого управляемого регулярного микрорельефа, так и созданием направленной текстуры материала поверхностного слоя. Получаемый на поверхности детали регулярный

микрорельеф может быть изменен в процессе обработки детали и позволяет создавать так называемые «масляные карманы», дополнительно способствующие повышению срока службы детали.

Были проведены сравнительные испытания рассматриваемого способа ОУО цилиндрических деталей, предусматривающего колебательные перемещения деформирующего ролика, и способа получения регулярного микрорельефа, описанного в работе [6]. Упрочняющей обработке подвергались цилиндрические валики диаметром 32 мм и длиной 250 мм, изготовленные из сталей 12Х3Р, 20ХН2МА и 50ХН. Предварительно валики подвергались шлифованию на круглошлифовальном станке мод. 3А150, в результате которого имели следующую среднюю микротвёрдость материала поверхностного слоя: сталь 12Х3Н – $HV_D = 280$ кгс/мм²; сталь 20ХН2МА – $HV_D = 300$ кгс/мм²; сталь 50ХН – $HV_D = 330$ кгс/мм². Шаг регулярного микрорельефа обработанной поверхности детали был принят равным $S_m = 50$ мкм. Обкатывание валиков осуществлялось на токарно-винторезном станке мод. 1А620 с использованием известного устройства для отделочно-упрочняющей обработки деталей методом ППД [5]. Деформирующий ролик диаметром 48 мм и радиусом рабочего профиля 16 мм был изготовлен из закалённой быстрорежущей стали Р6М5 и имел микротвёрдость поверхностного слоя рабочего профиля $HV_P = 480$ кгс/мм². Принятые режимы обработки (усилие обкатки P , Н; продольная подача деформирующего ролика S , мм/об; частота вращения обрабатываемой детали n_d , об/мин) и параметры дополнительного перемещения деформирующего ролика (амплитуда A , мм; частота колебаний f , Гц; величина дополнительного возвратно-поступательного перемещения ролика L , мм) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Режимы обработки валиков (P , S , n_d) и параметры
колебательных перемещений деформирующего ролика (A , f , L)

Материал валиков	P , Н	S , мм/об	n_d , об/мин	A , мм	f , Гц	L , мм
12Х3Н	500	0,15	200	0,025	2	0,04
20ХН2МА	600	0,15	160	0,020	2	0,03
50ХН	800	0,1	125	0,015	1,5	0,03

Испытания обработанных валиков на усталостную прочность и износостойкость производилось на специальных установках для испытания материалов на усталостную прочность, описанных в работе [7]. При испытаниях определялись следующие эксплуатационные показатели обработанной поверхности валиков: интенсивность изнашивания I , мг/час; максимальное допустимое напряжение в сечении испытываемых на усталостную прочность валиков σ_{-1} , МПа, при установленном числе циклов нагружений $N_u = 10^4$ циклов. Результаты сравнительных испытаний валиков приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты сравнительных испытаний разработанного способа ОУО деталей
и известного по [20]

Материал валиков	Обработка по способу из [20]		Разработанный способ	
	I , мг/час	σ_{-1} , МПа	I , мг/час	σ_{-1} , МПа
12ХН3А	12,5	38	6,7	56
20ХН2МА	10,3	41	5,2	64
50ХН	8,6	57	4,5	89

Анализ представленных в табл. 2 результатов испытаний позволяет сделать вывод о том, что применение разработанного способа ОУО цилиндрических деталей, при котором деформирующий ролик совершает дополнительные заранее заданные колебания и перемещения, обеспечивает практически в 2 раза увеличение сопротивляемости материала поверхностного слоя деталей изнашиванию и на 40–50% повышает их усталостную прочность.

Перспективным направлением повышения работоспособности деталей трибосистем является ОУО с одновременным нанесением на их рабочие поверхности металлополимерных и МКС на полимерной основе [1]. Однако область применения таких слоёв в трибосистемах ограничена температурой в зоне контакта, которая, как показывают исследования, не должна быть выше температуры деполимеризации используемого полимера более чем на 20%. В связи с этим был разработан способ ОУО рабочих поверхностей деталей трибосистем, заключающийся в одновременном обкатывании поверхности роликом и создании в нём модифицированного слоя.

Обработка исследуемых деталей осуществлялась на модернизированной установке для индукционного нагрева, смонтированной на базе токарно-револьверного станка [1]. Для создания модифицированного слоя на поверхности детали в зону контакта упрочняющего ролика с обрабатываемой поверхностью детали подавалась алюминиевая фольга с нанесённым и закреплённым на ней с помощью клея «Glue stick» графитовым порошком. Для обеспечения равномерного распределения графита на поверхности фольга медленно пропускалась через специальное устройство, наполненное графитовым порошком. Лента фольги шириной 5 мм с закреплённым на ней графитом подавалась в зону обкатки таким образом, чтобы графитовый слой был обращён к обрабатываемой поверхности детали.

В лабораторных и производственных условиях ОУО подвергались бесступенчатые валики из стали 12Х3Н диаметром 40 мм и длиной 320 мм, прошедшие шлифование и имеющие начальную шероховатость $R_a = 0,80\text{--}1,20$ мкм. Упрочняющие ролики изготавливались из быстрорежущей стали Р6М5 и после закалки имели твёрдость HRC 62...65. Были приняты следующие режимы обкатки: усилие прижима ролика $P = 1000$ 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 локального нагрева в диапазоне

250–300 °С. Такие режимы обработки позволяют создавать на поверхности детали трибосистемы достаточно плотный слой, толщиной 0,8–1,2 мм, имеющий твёрдость, равную 80–90% твёрдости основного материала детали и хорошую сцепляемость с ним ($\tau_{сц} = 150\text{--}180$ МПа). Содержащийся в нём графит хорошо удерживается алюминием, который в процессе обкатки создаёт как бы своеобразный каркас для слоистых частичек графита (рис. 1). Анализ представленных фотографий свидетельствует о том, что сама структура получающегося на поверхности детали трибосистемы существенно зависит от режимов ОУО.

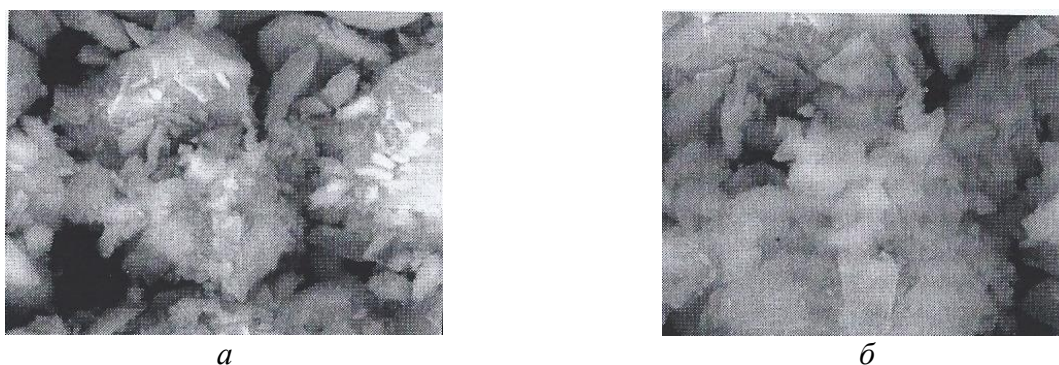


Рис. 1. Состояние модифицированного поверхностного слоя детали трибосистемы; *а* – $P = 800$ Н, $n_{\partial} = 100$ об/мин, $S_{np} = 0,15$ мм/об, $m = 2$, $I = 2,0$ КА; *б* – $P = 1000$ Н, $n_{\partial} = 80$ об/мин, $S_{np} = 0,1$ мм/об, $m = 3$, $I = 2,5$ КА (увеличение 75)

Исследования работоспособности сформировавшегося на поверхности детали модифицированного слоя проводились на установках, обеспечивающих различные условия трения [7]. Было установлено, что создание на поверхностях деталей трибосистем модифицированного слоя путём ОУО с применением алюминиевой фольги и графита позволяет существенно снизить коэффициент трения при повышенных температурах в зоне контакта взаимодействующих поверхностей (рисунок 2).

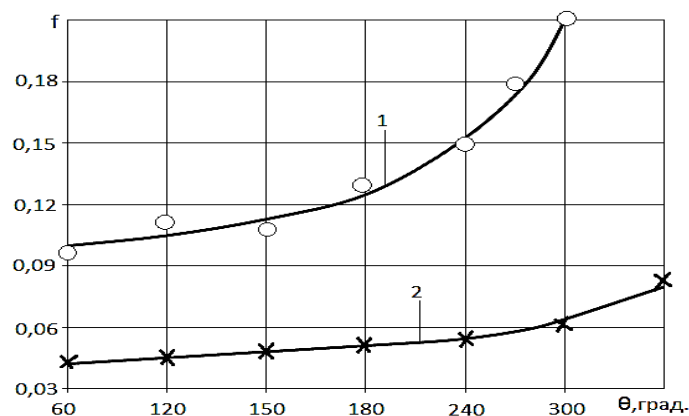


Рис. 2. Изменение коэффициента трения f от температуры в зоне контакта Θ при обычном трении (кривая 1) и с модифицированным слоем (кривая 2):

$$p = 0,5 \text{ МПа}, V_{ск} = 0,2 \text{ м/с}.$$

Используя метод планирования эксперимента типа 2^k [8], были получены следующие эмпирические зависимости интенсивности изнашивания I для следующих диапазонов изменения давления p , скорости скольжения $V_{ск}$ и температуры в зоне контакта Θ :

$$p = 0,2 - 1,0 \text{ МПа}; V_{ск} = 0,1 - 0,5 \text{ м/с}; \Theta = 50 - 150^\circ\text{C};$$

$$I = 4,754 p^{0,792} V_{ск}^{0,426} \Theta^{0,275}, \text{ мг/час};$$

$$p = 1,0 - 1,5 \text{ МПа}; V_{ск} = 0,5 - 1,0 \text{ м/с}; \Theta = 150 - 250^\circ\text{C};$$

$$I = 5,947 p^{0,704} V_{ск}^{0,434} \Theta^{0,361}, \text{ мг/час};$$

$$p = 1,5 - 2,5 \text{ МПа}; V_{ск} = 1,0 - 2,0 \text{ м/с}; \Theta = 250 - 400^\circ\text{C};$$

$$I = 6,1284 p^{0,753} V_{ск}^{0,486} \Theta^{0,412}, \text{ мг/час}.$$

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 трибосистемы 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. Электронно-микроскопические исследования проводились на сканируемом электронном микроскопе «Quanta – 200» (производитель FEI – Company Holland) с использованием приставки энерго-дисперсного

анализа «Genesis Quanta – 200». Результаты выполненных исследований в виде спектрограмм поверхностей контртел приведены на рисунке 3, 4, анализ которых свидетельствует о переносе частиц йода на контактирующую поверхность.

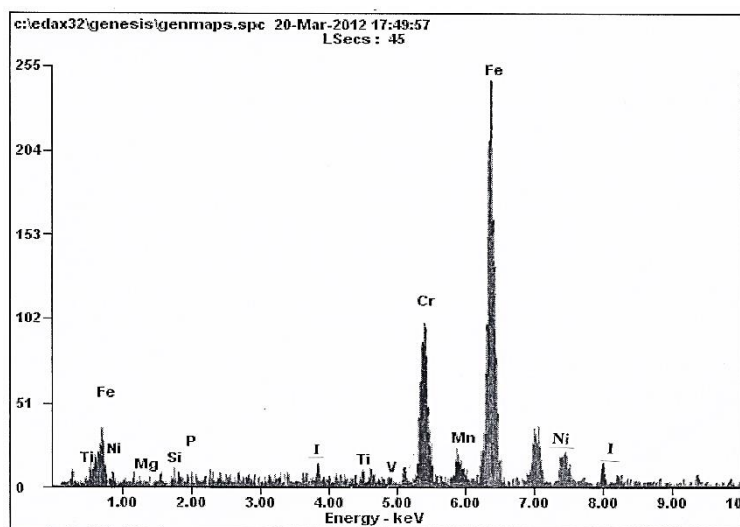


Рис. 3. Спектрограммы поверхностей контртел из сталей X18H9T после контакта с образцами с модифицированными алюминием, графитом и кристаллическим йодом поверхность

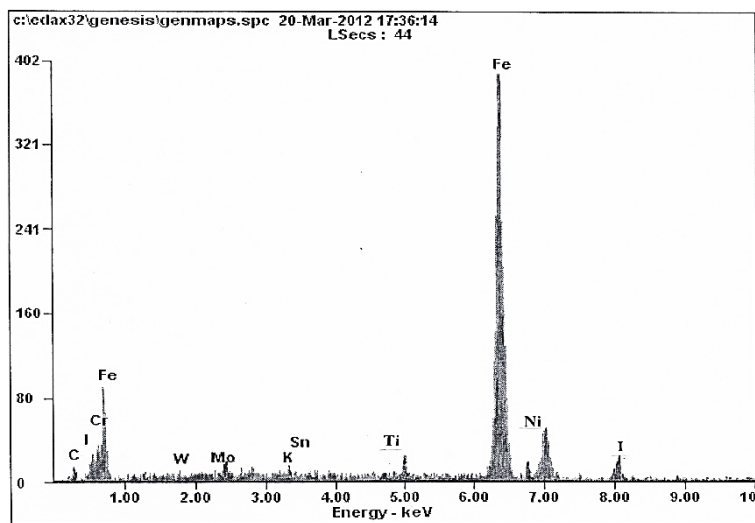


Рис. 4. Спектрограммы поверхностей контртел из сталей 12Х3Н после контакта с образцами с модифицированными алюминием, графитом и кристаллическим йодом поверхность

Толщина образующейся на поверхности тела йодной смазочной плёнки не превышает 0,1 мкм. Практика показывает, что создание на поверхностях деталей трибосистем модифицированного слоя с графитом и йодом целесообразно при

температурах в зоне контакта 300–500° С, давлении $p = 2,0\text{--}4,0$ МПа и скорости скольжения $V_{ск} = 0,2\text{--}1,0$ м/с. Такие условия эксплуатации характерны для литейного и кузнечно-штамповочного оборудования. Предварительно проведённые производственные испытания показали, что применение ОУО деталей трибосистем с созданием на их поверхностях модифицированного слоя даёт наибольшую эффективность для тяжело нагруженных узлов машин и механизмов, эксплуатируемых в агрессивных средах, например, в литейных машинах, а также кузнечно-штамповочном и листопрокатном оборудовании [1].

Список литературы

1. Бутенко В.И. Научноёмкие технологии создания высокоресурсных деталей машин / В.И. Бутенко, Д.С. Дуров, Р.Г. Шаповалов. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2014. – 404 с.
2. Бутенко В.И. Структура и свойства поверхностного слоя деталей трибосистем. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – 367 с.
3. Бутенко В.И. Локальная отделочно-упрочняющая обработка поверхностей деталей машин. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2008. – 126 с.
4. Суслов А.Г. Научные основы технологии машиностроения / А.Г. Суслов, А.М. Дальский. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
5. Бутенко В.И. Устройство для упрочняюще-чистового обкатывания деталей / В.И. Бутенко, Д.И. Диденко // Патент РФ №2184024, МПК В24В39/00. Заявл. 17.1.2001. Оpubл. 27.06.2002. Бюл. №18.
6. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микро-рельефом. – Л.: Машиностроение, 1982. – 248 с.
7. Бутенко В.И. Научные основы нанотрибологии. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – 275 с.
8. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1971. – 283 с.