

УДК 621.81.004.1

В.В. Надуваев, к.т.н., доц.**Е.Н. Фролов, к.т.н., доц.****А.Н. Прокофьев, д.т.н., проф.***Брянский государственный технический университет,
Брянск, Россия*

ПРОЦЕССЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Рассмотрены перспективные комбинированные упрочняюще-отделочные процессы на основе электрофизических методов с последующей отделочной обработкой инструментом из синтетических сверхтвердых материалов, позволяющие управлять металлофизическими характеристиками поверхностных слоев деталей машин.

Введение. Качество и продолжительность эксплуатации наиболее ответственных деталей машин в значительной степени определяются состоянием и свойствами поверхностного слоя рабочих поверхностей, подвергаемых различным видам финишной обработки. В последние годы в качестве окончательной обработки ответственных поверхностей деталей машин наиболее перспективными являются комбинированные упрочняюще-отделочные процессы, которые создаются на базе электрофизических методов обработки, позволяющих наиболее гибко управлять состоянием и свойствами рабочих поверхностей слоев тяжело нагруженных деталей. Предлагаемые метод финишной обработки решающим образом влияют на такие служебные и эксплуатационные свойства деталей, как износостойкость, сопротивление усталости, контактная жесткость, виброустойчивость и многие другие.

Основная часть. В предлагаемых исследованиях рассматривалась комбинированная упрочняюще-отделочная обработка на основе лазерного или электромеханического упрочнения и последующей отделочной обработки с применением инструментов из синтетических сверхтвердых материалов, в частности, алмазным выглаживанием. На стадии упрочняющей обработки представлялось возможным управлять металлофизическими характеристиками поверхностных слоев деталей машин, например, твердостью, а на стадии отделочной обработки – параметрами, определяющими микрогеометрию. Одним из недостатков лазерного упрочнения является ухудшение поверхности, особенно, если упрочнение производится с режимами, вызывающими частичное или полное оплавление поверхностного слоя. Это вызывает, если принять во внимание значительное увеличение микротвердости упрочненных по-

верхностей, повышенный износ сопряженной поверхности контртел. Так интенсивность изнашивания контртел из бронзы Бр О5Ц5С5, сопрягаемых с цилиндрическими образцами из стали 45, упрочненных лазерной обработкой (испытания проводились при граничной смазке маслом «Индустиральное 12», при скорости скольжения 0,9 м/с и давлении 2,2 МПа) оставила от $1,24 \cdot 10^{-6}$ до $3,32 \cdot 10^{-7}$ (табл. 1).

Таблица 1

Шероховатость упрочненных лазерной обработкой поверхностей образцов из стали 45 R_{max} в мкм (в скобках) и интенсивность изнашивания контртел из бронзы Бр О5Ц5С5 $J \cdot 10^9$

Плотность энергии излучения (Q)	Коэффициент перекрытия пятен (П)	
	$\Pi_1 = 0$	$\Pi_2 = 0,5$
$Q_1 = 1,3 \text{ Дж/мм}^2$	331,85	296,78
	281,01 (3,28)	217,91 (2,78)
$Q_2 = 2,5 \text{ Дж/мм}^2$	1721,15	1897,15
	1242,51 (8,25)	2049,05 (5,94)

Диаметр пятна контакта лазерного луча с обрабатываемой поверхностью составлял 4 мм. Образцы изготавливались из стали в стадии поставки.

Дисперсионный анализ экспериментальных данных (табл. 2) показывает, что интенсивность изнашивания контртел из бронзы (образцы, упрочненные лазерной обработкой, за время испытания практически не изнашивались) зависит в основном от плотности энергии излучения Q наименьшая интенсивность изнашивания контртел $J = 2,82 \cdot 10^{-7}$ соответствует $Q_1 = 1,3 \text{ Дж/мм}^2$, влияние фактора П и совместное влияние факторов QП оказываются незначимыми даже на уровне значимости $\alpha = 0,10$. Причем 64,45 % вариации интенсивности изнашивания $J \cdot 10^9$, по данным корреляционного анализа, связано с параметром шероховатости R_{max} упрочняемых образцов.

После последующей механической обработки упрочненных лазерной обработкой образцов накатыванием и алмазным виброполированием, интенсивность изнашивания контртел из бронзы значительно уменьшилась (в отдельных случаях на несколько порядков) и составила от $2,19 \cdot 10^{-7}$ до $5,8 \cdot 10^{-11}$ (табл. 3).

Накатывание образцов из стали 45 (диаметр которых составил 40 мм) осуществлялось роликом с каплевидным контактом (диаметр ро-

лика $\rho = 1$ мм, тангенс угла вдавливания $\tau\rho = 0,009$, усилие деформирования $P = 800$ Н, скорость обкатывания $V = 56$ м/мин., подача $s = 0,096$ мм, число рабочих ходов $i = 1$). Алмазное виброполирование осуществлялось без смазочно-охлаждающей жидкости.

Параметр шероховатости R_{\max} образцов после накатывания уменьшился в среднем в 2 раза – с 3,26...15,98 до 1,49...5,64 мкм, после алмазного виброполирования – в среднем в 2,3 раза – с 2,83...8,81 до 1,31...5,92 мкм.

Таблица 2

Результаты дисперсионного анализа экспериментальных данных

Источник влияния	Число степеней свободы	Сумма квадратов	Средний квадрат	F-отношение
Факторы:	1	4173608,3	41739-608,3	128,52
Взаимодействие	1	96881,4	96881,4	2,98
	1	144913,0	144913,0	4,46
Случайные факторы (ошибка)	4	129887,9	32472,0	–
Сумма	7	4545290,7	–	–

Примечание: Критическое значение F-отношения: $F_{1,4} 0,05 = 7,71$; $F_{1,4} 0,10 = 4,54$

Таблица 3

Интенсивность изнашивания контртел из бронзы Бр О5Ц5С5 $J \cdot 10^9$, трущихся в паре с упроченными лазерной обработкой образцами из стали 45, подвергнутых последующей механической обработке

Плотность энергии излучения (Q)	Механическая обработка			
	накатывание (M_1)		алмазное выглаживание (M_2)	
	коэффициент перекрытия пятен (Π)			
	$\Pi_1 = 0$	$\Pi_2 = 0,5$	$\Pi_1 = 0$	$\Pi_2 = 0,5$
$Q_1 = 1,3$ Дж/мм ²	108,150	0,132	0,083	0,058
	162,824	0,084	0,458	0,067
$Q_2 = 2,5$ Дж/мм ²	15,113	12,256	186,976	0,482
	93,170	55,742	219,411	0,157

Как показывает дисперсионный анализ данных таблицы 4, наибольшее влияние на интенсивность изнашивания контртел из бронзы

оказывает характер перекрытия пятен при лазерном упрочнении образцов (в среднем, фактору $\Pi_2 = 0,5$ соответствует интенсивность изнашивания J на порядок меньше, чем для случая, когда $\Pi_1 = 0$), совместное влияние факторов QPM наименьшая величина J соответствует следующим сочетаниям факторов ($Q_1\Pi_1M_2$, $Q_1\Pi_1M_1$, $Q_1\Pi_2M_1$ и $Q_2\Pi_1M_2$ для которых среднее значение $J = 1,88 \cdot 10^{-10}$, что на несколько порядков меньше, чем для остальных сочетаний).

Таблица 4

Результаты дисперсионного анализа экспериментальных данных

Источник влияния	Число степеней свободы	Сумма квадратов	Средний квадрат	F-отношение
Факторы:				
Q	1	6062,6	6062,6	8,07*
П	1	32149,1	32149,4	42,77**
М	1	98,9	98,9	<1
Взаимодействия:				
QP	1	1911,0	1911,0	2,54
QM	1	15704,7	15704,7	20,89**
PM	1	565,5	565,5	<1
QPM	1	25265,5	25265,5	33,62**
Случайные факторы (ошибка)	8	6012,7	751,6	–

Примечание: ** – влияние фактора или взаимодействия значимо на уровне $\alpha = 0,01$; * – то же на уровне $\alpha = 0,05$

Влияние фактора Q оказывается менее существенным (в среднем, когда образцы из стали 45 упрочняются на уровне плотности энергии излучения $Q_1 = 1,3 \text{ Дж/мм}^2$, интенсивность изнашивания контртел из бронзы в 2 раза меньше) и зависит от метода последующей механической обработки стальных образцов (наименьшая интенсивность изнашивания соответствует сочетанию факторов Q_1M_2).

Таким образом, последующая механическая обработка упрочненных лазерной обработкой поверхностей деталей способствует значительному повышению (для оптимальных условий лазерного упрочнения на несколько порядков) износостойкости сопрягаемых деталей и пары трения в целом. Алмазное виброполирование является предпочтительным видом обработки, однако преимущества накатывания в ряде случаев неоспоримы, например, в случае лазерного легирования, когда необходимо полностью сохранить упрочненный слой.

Аналогично тому, как проводилась импульсная лазерная обработка, была осуществлена импульсная электромеханическая обработка (ЭМО). Процесс ЭМО характеризуется, в частности, локальным нагревом металла поверхностного слоя заготовки в месте ее контакта с ин-

струментом, через который пропускается электрический ток большой силы и низкого напряжения. Электроконтактный нагрев обуславливается выделением тепла Q на участке цепи, обладающем электросопротивлением $R_{ЭЭ}$, при протекании тока $J_{ЭФФ}$ в течение импульса длительностью t , т. е.:

$$Q = \int_0^t \int_0^T J_{ЭФФ}^2(t) R_{ЭЭ} T dT dt ,$$

где $J_{ЭФФ}$ – эффективное значение тока; $R_{ЭЭ}$ – активное сопротивление участка цепи между электродами контактной машины; t и T – координаты времени и температуры.

Так как технологический процесс ЭМО относительно длительный, следует учитывать также условия теплоотвода и связанные с этим потери тепла. Максимальная температура нагрева детали в месте подвода тока при ЭМО должна быть такой, чтобы обеспечивались необходимые глубина и твердость упрочненного слоя, компенсировались теплоотвод и в обрабатываемую заготовку, инструмент и теплопередача в охлаждающую жидкость.

Импульсная схема пропускания тока предусматривает определенную длительность импульсов тока $t_{имп}$ и пауз между ними $t_{пауз}$. Это способствует перераспределению тепла в моменты пауз во всех приконтактных объемах, стабилизирует сопротивление $R_{ЭЭ}$ к моменту пропускания очередного импульса тока. Выбор $t_{имп}$ и $t_{пауз}$ будет влиять не только на максимальную температуру нагрева материала слоя и стабильность процесса ЭМО, но и на глубину слоя, площадь пятна контакта, производительность и экономические показатели упрочнения. Значения $t_{имп}$ и $t_{пауз}$ для конкретных деталей следует выбирать экспериментально, взяв за основу рекомендации по выбору $t_{имп}$ и $t_{пауз}$ для импульсной и контактной шовной сварки, а так же при электроконтактной наварке порошковых материалов.

Изменяя длительность электромеханических импульсов и пауз между ними, а так же скорость перемещения заготовки относительно инструмента, удается получить упрочненные поверхности с регулярной микротвердостью. Как показали предварительно выполненные исследования, поверхностная микротвердость упрочненных участков после ЭМО на деталях их стали 45 составила от 6532 до 7910 МПа. Максимальное упрочнение наблюдалось до глубины 0,4...0,8 мм, переходный слой – до 2 мм, что позволяет проводить последующую обработку шлифованием и другими методами с применением инструментов из синтетических сверхтвердых материалов.

Анализ микроструктуры упрочненного слоя показал, что она имеет характерное игольчатое строение, как у мартенсита после закалки. Микростроение переходного слоя характеризуется зернистой неравноосностью и резко отличающейся микротвердостью в зависимости от природы зерна. Так, ферритные зерна упрочнялись до 3000...3470 МПа, а исходные перлитные, имеющие тросто-сорбитное строение, – до 4740...6350 МПа. При этом микротвердость исходного состояния стали составляла 2200...2600 ПМа.

Для оценки прирабатываемости поверхностей трения после ЭМО было выполнено сравнение с комбинированной обработкой, основанной на химико-термическом воздействии (цементацией).

Исследования проводились по плану двухфакторного эксперимента с двумя повторениями. В качестве первого фактора использовался метод упрочняющей обработки цилиндрических образцов M_4 , варьируемой на двух уровнях (цементация и электрохимическая обработка), в качестве второго фактора – метод отделочной обработки M_0 , также варьируемый на двух уровнях (шлифование и алмазное выглаживание).

Цементируемые цилиндрические образцы изготавливались из легированной стали, содержащей 3 % хрома и 0,2 % углерода, образцы, подвергаемые электрохимическому упрочнению, – из легированной стали, содержащей 1 % хрома, 2 % никеля и 0,4 % углерода. Электрохимическому упрочнению образцов предшествовала их объемная закалка (HRC₃ 32...38). Перед алмазным выглаживанием цилиндрически образцы подвергались шлифованию, а затем фрикционному меднению.

Нанесение фрикционных медных пленок, с одной стороны, интенсифицировало процесс алмазного выглаживания, поскольку снижало коэффициент трения между алмазным индетором и обрабатываемой поверхностью, и, с другой стороны, улучшало процесс приработки трущихся пар, способствуя их переходу в режим избирательного переноса.

Геометрические параметры качества рабочих поверхностей цилиндрических образцов (R_a , радиус скругления вершин неровностей ρ , безразмерный комплекс Крагельского-Комбалова $\Delta = R_{\max}/b\rho^{1/v}$, где b и v параметры степенной аппроксимации начального участка опорной кривой профиля неровностей) приведены в таблице 5.

Изнашивание образцов выполнялось по схеме «Вал–частичный вкладыш» на машине трения СМЦ-2 при скорости скольжения 107 м/мин. и давлении 150 МПа в условиях граничного трения. Материал вкладышей – бронза БР 010С10. Длительность испытания на изнашивание составляла 24 часа. Рабочая поверхность вкладышей подвергалась растачиванию ($R_a = 0,8$ мкм).

Таблиця 5

Геометрические параметры качества рабочих поверхностей цилиндрических образцов

Метод упрочняющей обработки реза	Параметры качества	Метод отделочной обработки поверхности трения реза			
		шлифование		алмазное выглаживание	
		до изнашивания	после изнашивания	до изнашивания	после изнашивания
Цементация	R_a , мкм	0,98	0,63	0,60	0,46
	ρ , мкм	33,2	90,9	470,8	369,9
	Δ	0,126	0,033	0,004	0,009
Электро-механическая обработка	R_a , мкм	1,0	0,67	0,76	0,71
	ρ , мкм	34,6	85,3	37,6	103,7
	Δ	0,121	0,035	0,091	0,023

Экспериментальные данные, полученные в процессе исследований, представлены в таблице 6. Как показали результаты дисперсионного анализа (табл. 7), изменчивость величин, характеризующих линейную интенсивность изнашивания образцов, интенсивность изнашивания контртел и в целом пар трения по массе, в большей мере связана с методами отделочной обработки поверхностей трения образцов, чем с методами их упрочняющей обработки.

Так, с методами отделочной обработки связано 69,15 % вариации величин, характеризующих линейную интенсивность изнашивания образцов, 41,3 % величин, характеризующих интенсивность изнашивания контртел по массе и 48,4 % величин, характеризующих интенсивность изнашивания по массе пар трения в целом. С методами упрочняющей обработки связано соответственно 6,4, 33,8 и 33,6 % вариации рассматриваемых величин.

Линейная интенсивность изнашивания образцов зависит также от взаимодействия исследуемых факторов M_4M_0 , т. е. влияние метода упрочняющей обработки на линейную интенсивность изнашивания зависит от того, какому методу отделочной обработки подвергнута рабочая поверхность цилиндрического образца и наоборот, влияние метода отделочной обработки зависит от того, каким методом был упрочнен образец (цементацией или электромеханической обработкой).

*Таблица 6
Экспериментальные данные по величине износа элементов трущихся пар*

Метод упрочняющей обработки образцов	Метод отделочной обработки поверхности трения образца					
	шлифование			алмазное выглаживание		
	износ образца		износ контртела, мг	износ образца		износ контртела, мг
	мкм	мг		мкм	мг	
Цементация	1,22	4,20	2,10	0,12	2,87	1,52
	0,94	3,24	2,80	0,13	1,00	0,90
Электро-механическая обработка	0,42	1,70	1,35	0,14	1,14	0,77
	0,61	2,02	2,02	0,30	0,47	1,07

*Таблица 7
Результаты дисперсионного анализа экспериментальных данных*

Источник изменчивости	Число степеней свободы	Сумма квадратов отклонений величин от общего среднего	Средний квадрат отклонений величин от общего среднего	Отношение F
Линейная интенсивность изнашивания образца J				
M_4	1	0,084	0,084	4,7
M_0	1	0,898	0,898	50,2
M_4M_0	1	0,245	0,245	13,7
Ошибка	4	0,071	0,018	—
Сумма	7	1,298	—	—
Интенсивность изнашивания образца по массе G				
M_4	1	4,440	4,440	7,46
M_0	1	4,176	4,176	7,01
M_4M_0	1	0,151	0,151	<1
Ошибка	4	2,381	0,595	—
Сумма	7	11,149	—	—

Обращает на себя внимание тот факт, что наименьший износ за время испытания имели цементируемые образцы, рабочая поверхность которых обработана алмазным выглаживанием. Очевидно, что именно данные образцы имели наибольший радиус скругления вершин неровностей $\rho = 470,8$ мкм (табл. 5), и это обусловило благоприятные условия поверхностей трения.

Как показали приведенные исследования, наименьшие значения величин линейного износа образцов, контртел и в целом пар трения по массе соответствуют электромеханической обработке и алмазному выглаживанию. Так, суммарный износ пар трения по массе, у которых образцы подвергались электромеханической обработке и алмазному выглаживанию, соответственно, в 1,76 и 1,99 раза меньше, чем у пар трения, образцы которых цементировались и обрабатывались шлифованием.

По результатам выполненных исследований был проведен однофакторный эксперимент с двумя повторениями. Исследуемый фактор (метод упрочняющей обработки – М) рассматривался на шести уровнях: $M_1(\text{Ц}+\text{Ш})$ – цементация + шлифование; $M_2(\text{Ц}+\text{АВ})$ – цементация + шлифование + алмазное выглаживание; $M_3(\text{ЭМО}+\text{Ш})$ – электромеханическая обработка, проводимая с перекрытием пятен контакта упрочняющего ролика с обрабатываемой поверхностью + шлифование; $M_4(\text{ЭМО}+\text{Ш})$ – электромеханическая обработка, проводимая без перекрытия пятен контакта упрочняющего ролика с обрабатываемой поверхностью + шлифование; $M_5(\text{ЭМО}+\text{АВ})$ – электромеханическая обработка (проводимая по первому варианту) + алмазное выглаживание; $M_6(\text{Ш}+\text{Л})$ – шлифование + лазерная обработка.

Обработке подвергались цилиндрические образцы диаметром 40 мм. Перед алмазным выглаживанием образцы подвергались фрикционному меднению. По экспериментальным данным определялась интенсивность изнашивания образцов: линейная и по массе, контртел – по массе, а так же рассчитывалась суммарная интенсивность изнашивания по массе для пары трения.

Как показали результаты дисперсионного анализа экспериментальных данных по интенсивности изнашивания элементов пар трения (у которых образцы упрочнялись цементацией, электромеханической и лазерной обработками), электромеханическая обработка почти не уступает лазерной по влиянию на износостойкость трущихся пар. Парам трения, у которых образцы упрочнялись электромеханической и лазерной обработкой, соответствовала наименьшая линейная интенсивность изнашивания цилиндрических образцов $1,7 \cdot 10^{-11}$ (что в 60 раз меньше, чем для образцов, подвергаемых цементации и последующему шлифованию) и контртел по массе $2,3 \cdot 10^{-8}$ мг/км (что в 2 раза

меньше, чем для контртел, контактирующих с образцами, упрочняемыми цементацией с последующим шлифованием).

Выводы. Результаты выполненных исследований позволили также установить, что наряду с упрочняющей обработкой на износостойкость трущейся пары оказывает влияние метод отделочной обработки ее рабочих поверхностей. Так, пары трения, у которых рабочая поверхность цилиндрических образцов подвергалась алмазному выглаживанию, по сравнению со шлифованием, имели лучшие результаты по линейной интенсивности изнашивания.

Проведенные исследования показали, что лазерная и электрохимическая обработка вызывают существенное повышение микротвердости поверхностных слоев детали (до 9000 МПа), однако, величина упрочнения распространяется на определенную весьма ограниченную величину, поэтому в качестве отделочных операций наиболее целесообразно применять методы поверхностного пластического деформирования, в частности, алмазное выглаживание, что в целом позволяет снизить величину начального износа трущихся поверхностей на 30 % и
2–3 раза сократить период их приработки.

НАДУВАЕВ Владимир Васильевич – кандидат технических наук, доцент Брянского государственного технического университета.

Научные интересы:

– технологическое обеспечение качества деталей машин.

ФРОЛОВ Евгений Николаевич – кандидат технических наук, доцент Брянского государственного технического университета.

Научные интересы:

– технологическое обеспечение качества деталей машин.

ПРОКОФЬЕВ Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор Брянского государственного технического университета.

Научные интересы:

– технологическое обеспечение качества деталей машин.

Подано 09.06.2011