

УДК 621.026.002

DOI: 10.30987/article_5cb58f4f1c9411.57562109

В.В. Надуваев, Е.Н. Фролов

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ И ЭЛЕМЕНТОВ ОСНАСТКИ

Рассмотрено широкое применение технологического обеспечения отделочно-упрочняющей обработки и различных финишных методов воздействия на работоспособность и продолжительность эффективной эксплуатации рабочих поверхностей деталей машин и наиболее тяжелонагруженных

элементов технологической оснастки, работающих в условиях высоких давлений и температур.

Ключевые слова: отделочно-упрочняющая обработка, технологическое обеспечение, работоспособность, продолжительность эксплуатации, качество рабочих поверхностей, сверхтвердые материалы.

V.V. Naduvaev, E.N. Frolov

WORKING CAPACITY TECHNOLOGICAL SUPPORT OF HEAVY DUTY PARTS AND PRODUCTION TOOLING ELEMENTS

The paper reports the consideration of technological support wide use in finishing and strengthening treatment and different finishing methods impact upon working capacity and efficient operation duration of machinery surfaces and most heavy duty elements of

production tooling working under conditions of high pressure and high temperatures.

Key words: finishing and strengthening treatment, technological support, working capacity, operation duration, working surface quality, super-hard materials.

Качество, работоспособность 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 и элементов технологической оснастки наиболее перспективными являются комбинированные упрочняюще-отделочные процессы, которые создаются на базе электрофизических методов обработки, позволяющих наиболее гибко управлять свойствами рабочих поверхностей тяжелонагруженных деталей.

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

(алмазное выглаживание или виброполирование). 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 поверхностей, повышенный износ сопряженной поверхности контртел. Интенсивность изнашивания контртел из бронзы Бр 05Ц5С5, сопрягаемых с цилиндрическими образцами из стали 45, упрочненными лазерной обработкой, приведена в табл. 1. Испытания проводились при смазке маслом «Индустриальное 12», скорости скольжения 0,9 м/с и давлении 2,2 МПа.

Таблица 1

Шероховатость упрочненных лазерной обработкой образцов из стали 45
и интенсивность изнашивания контртел из бронзы

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

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

Дисперсионный анализ эксперимен-

тальных данных (табл. 2) показал, что интенсивность изнашивания контртел из бронзы зависит в основном от плотности энергии излучения Q .

Таблица 2

Результаты дисперсионного анализа экспериментальных данных

Источник влияния	Число степеней свободы	Сумма квадратов	Средний квадрат	F -отношение
Факторы:	11	4173608,3	4173966,0	2,98
Взаимодействие	1	144913,0	144913,0	4,46
Случайные факторы	4	129887,9	32472,0	-
Сумма	7	4545290,7	-	-

Поскольку лазерная и электрохимическая обработка вызывают существенное повышение микротвердости поверхностных слоев (до 8000-9000 МПа), а также учитывая то, что поверхностные слои имеют ограниченную глубину упрочнения, в качестве отделочных операций целесообразно принять методы поверхностного пластического деформирования (алмазное выглаживание) и алмазно-абразивной обработки (алмазное виброполирование).

После последующей механической обработки упрочненных лазерной обра-

боткой образцов 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).

Параметр шероховатости R_{max} образцов после алмазного выглаживания уменьшается в среднем в 2 раза - с 3,26 до 1,49 мкм, после алмазного виброполирования - в среднем в 2,3 раза, с 2,83 до 1,31 мкм.

Таблица 3

Интенсивность изнашивания контртел из бронзы Бр 05Ц5С5 $J \cdot 10^{-9}$, трущихся в паре с упрочненными лазерной обработкой образцами из стали 45

Плотность энергии излучения (Q)	Механическая обработка			
	Алмазное виброполирование (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
$Q_2 = 2,5$ Дж/мм ²	93,170	55,742	186,976	0,157

Влияние фактора Q оказывается менее существенным, изнашивание больше 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 износостойкости сопрягаемых деталей и пары трения в целом. Алмазное виброполирование является предпочтительным видом обработки, однако преимущества выглаживания 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 инструментом, через который пропускается электрический ток большой силы и низкого напряжения. Электроконтактный нагрев обусловливается выделением тепла Q на участке цепи, обладающем электросопротивлением $R_{ЭЭ}$, при протекании тока $J_{ЭФФ}$ в течение импульса длительностью t :

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

где $J_{\text{ЭФФ}}$ - эффективное значение тока; $R_{\text{ЭЭ}}$ - 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. Импульсная схема пропускания тока предусматривает определенную длительность импульсов тока $t_{\text{имп}}$ и пауз между ними $t_{\text{пауз}}$. Это способствует перераспределению тепла

в моменты пауз во всех приконтактных объемах, стабилизирует сопротивление $R_{\text{ЭЭ}}$ к моменту пропускания очередного импульса тока. Выбор $t_{\text{имп}}$ и $t_{\text{пауз}}$ будет влиять не только на максимальную температуру нагрева материала и стабильность процесса ЭМО, но и на глубину слоя, площадь пятна контакта, производительность и экономические показатели упрочнения. Значения $t_{\text{имп}}$ и $t_{\text{пауз}}$ для конкретных деталей следует выбирать экспериментально, взяв за основу рекомендации по выбору $t_{\text{имп}}$ и $t_{\text{пауз}}$ для импульсной и контактной шовной сварки. Изменяя длительность электромеханических импульсов и пауз между ними, а также 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 6532-7910 МПа. Максимальное упрочнение наблюдается 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 троостосорбитное строение, - до 4740-6350 МПа. При этом микротвердость стали в исходном состоянии составляла 2200-2600 МПа.

В результате комбинированной отделочно-упрочняющей обработки, основанной на использовании лазерного или электромеханического упрочнения и последующего алмазного выглаживания или алмазного виброполирования, удается осуществить, с одной стороны, управление физико-механическими свойствами поверхностных слоев (поверхностной микротвердостью, глубиной и другими показате-

лями упрочнения) за счет изменения режимов упрочнения и учета закономерностей влияния технологической наследственности и, с другой стороны, управление геометрическими параметрами поверхностных слоев за счет выбора методов и изменения условий осуществления отделочной обработки [1]. Экспериментальные данные, полученные в процессе исследований, представлены в табл. 4.

На основе комбинированной обработки, осуществляемой лазерным упрочнением и последующим алмазным виброполированием, предложен метод, обеспечивающий создание нового класса поверхностей с регулярным рельефом (с отношением шага неровностей к высоте от 1000 до 2000), имеющих микротвердость поверхностных слоев на упрочненных участках до 10 000 МПа, и позволяющий снизить величину начального износа трущихся поверхностей.

Исходя из различной интенсивности съема материала с упрочненных и неупрочненных лазерной обработкой участков при алмазном виброполировании получены уравнения, позволяющие теоретически определить важнейшие в функциональном отношении параметры регулярного рельефа в зависимости от плотности энергии лазерного излучения, времени полирования и соотношения площадей поверхностей, упрочненных и неупрочненных лазерной обработкой. Так, интенсивность изнашивания пар трения «упрочненная лазерной или электромеханической обработкой цилиндрическая поверхность детали из стали 40ХН2МА - контртело из бронзы Бр05Ц5С5» в условиях граничного трения при изменении метода отделочной обработки упрочненных поверхностей уменьшается с 1,69 до 0,84 мг/с, т.е. в 2 раза [2].

Таблица 4

Экспериментальные данные по величине износа элементов оснастки

Метод упрочняющей обработки	Метод отделочной обработки поверхности трения					
	Алмазное виброполирование			Алмазное выглаживание		
	износ образца		износ контртела в мг	износ образца		износ контртела в мг
	в мкм	в мг		в мкм	в мг	
Лазерная	1,22-0,94	4,20-3,24	2,10-2,80	0,12-0,13	2,87-1,00	1,52-0,90
Электромеханическая	0,42-0,61	1,70-2,02	1,35-2,02	0,14-0,30	1,14-0,47	0,77-1,07

Как показали результаты дисперсионного анализа экспериментальных данных по интенсивности изнашивания элементов пар трения, 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 $1,7 \cdot 10^{-11}$ мкм/км. 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 цилиндри-

ческих образцов подвергалась алмазному выглаживанию, по сравнению с виброполированием имели лучшие результаты по линейной интенсивности изнашивания.

Проведенные исследования показали, что лазерная и электромеханическая обработка вызывают существенное повышение микротвердости поверхностных слоев детали (до 9000 МПа), однако упрочнение распространяется на весьма ограниченную глубину. 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 в 2-3 раза сократить период их приработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Надуваев, В.В. Технологическое обеспечение продолжительности эксплуатации тяжелонагруженных деталей и элементов производственной оснастки / В.В. Надуваев, Е.Н. Фролов // Международная научно-техническая конференция «Металлообработка - 2015». – Минск, 2015. – С. 11-13.

2. Надуваев, В.В. Отделочно-упрочняющая обра-

ботка деталей машин и элементов технологической оснастки / В.В. Надуваев, Е.Н. Фролов // Международная научно-техническая конференция «Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий». – Ростов н/Д: ДГТУ, 2018. – С. 72-73.

1. Naduvaev, V.V. Operation duration technological support of heavy duty parts and production tooling elements / V.V. Naduvaev, E.N. Frolov // *The Inter. Scientif. Tech. Conf. "Metalworking – 2015"*. – Minsk, 2015. – pp. 11-13.

2. Naduvaev, V.V. Finishing and strengthening treat-

ment of machinery and production tooling elements / V.V. Naduvaev, E.N. Frolov // *The Inter. Scientif. Tech. Conf. "Promising Directions in Development of Finishing and Strengthening Treatment and Vibration Wave Techniques"*. – Rostov-upon-Don: DSTU, 2018. – pp. 72-73.

Статья поступила в редакцию 11.12.18.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета

Хандожко А.В.

Статья принята к публикации 22. 03. 19.

Сведения об авторах:

Надуваев Владимир Васильевич, к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения» Брянского государственного технического университета, e-mail: nsp32@yandex.ru.

Naduvaev Vladimir Vasilievich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. "Engineering Technique", Bryansk State Technical University, e-mail: nsp32@yandex.ru.

Фролов Евгений Николаевич, к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения» Брянского государственного технического университета, e-mail: nsp32@yandex.ru.

Frolov Evgeny Nikolaevich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. "Engineering Technique", Bryansk State Technical University, e-mail: nsp32@yandex.ru.